

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК І ТЕХНОЛОГІЙ
(повне найменування інституту, факультету)

КАФЕДРА СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ
МАТЕМАТИКИ
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломної роботи
другий (магістерський)
(ступінь вищої освіти)

на тему: **Прогноз потужності вітрової турбіни**
(назва теми)

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи КНТ-812М

Спеціальності 124 - Системний аналіз
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
«Інтелектуальні технології та прийняття рішень
в складних системах»

КОНДРАТЕНКО В.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник ШИРОКОРАД Д.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент ДУМІН О.М.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Комп'ютерних наук і технологій

Кафедра Системного аналізу та обчислюваної математики

Ступінь вищої освіти другий (магістрський)

Спеціальність 124 – Системний аналітик

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) «Інтелектуальні технології та прийняття

(назва освітньої програми (спеціалізації)

рішень в складних системах»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Еліна ТЕРЕЩЕНКО

« 22 » грудня 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

КОНДРАТЕНКО ВІТАЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Прогноз потужності вітрової турбіни

керівник проекту (роботи) Ширококорд Дмитро Вікторович, к.ф.-м.н., доцент.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «6» грудня 2023 року № 492.

2. Строк подання студентом проекту (роботи) «22» грудня 2023 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи):) Питомі валові потенціали вітрової енергії за різних швидкостей вітру, типу місцевості та умов експлуатації

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити

1 Використання енергії вітру. 2 Кліматологічне оцінювання території України за вітроенергетичним потенціалом. 3 Вибір вітрової турбіни. 4 Сучасні методи прогнозування генерації вітрових електростанцій. 5 Обґрунтування застосування нечіткої логіки при проектуванні та експлуатації вітроенергетичних установок. 6 Практична реалізація.

5. Перелік графічного матеріалу, (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) Спеціальний пакет розширення Fuzzy Logic Toolbox.

6. Консультанти розділів проекту (роботи): Ширококоряд Д.В., к.ф.-м.н. ст. викл.

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Прийняв виконане завдання
1	ШИРОКОРАД Д.В, доц.	Ширококоряд Д.В	Ширококоряд Д.В
2	ШИРОКОРАД Д.В, доц.	Ширококоряд Д.В	Ширококоряд Д.В
3	ШИРОКОРАД Д.В, доц.	Ширококоряд Д.В	Ширококоряд Д.В
Нормоконтроль	ШИРОКОРАД Д.В, доц.		

7. Дата видачі завдання « _____ » _____ 20__ року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Сформулювати мету та основні завдання дипломної роботи	01.10.2023	
2	Вітроенергетика України. Вибір вітрові турбіни	11.10.2023	
3	Кліматичні ресурси вітрової енергії в Україні	01.11.2023	
4	Вибір методу прогнозування	15.11.2023	
5	Нечіткі множини і нечітка логіка	16.11.2023	
6	Розробка алгоритму для прогнозування потужності вітрової турбіни	30.11.2023	
7	Результати алгоритму прогнозування	19.12.2023	
8	Оформлення пояснювальної записки	21.12.2023	
9	Попередній захист дипломної роботи	14.12.2023	
10	Захист дипломної роботи	22.12.2023	

Студент _____ Віталій КОНДРАТЕНКО _____
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи) _____ Дмитро ШИРОКОРАД _____
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

ЗМІСТ

Завдання.....	2
Реферат	5
Перелік умовних позначень.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ВІТРОВА ЕНЕРГІЯ	9
1.1 Переваги Вітрової Енергії.....	9
1.2.1 Потенціал потужності вітроелектростанцій України.....	12
1.2.2 Український сектор вітрової енергетики в умовах війни.....	14
1.3. Географічне зонування – основа оцінки вітрового потенціалу України..	18
1.3.1 Кліматичні ресурси вітрової енергії в Україні.....	22
1.3.2 Районування території України за потенціалом вітрової енергії.	28
1.4 Вітроенергетичні установки	30
1.5 Висновки до першого розділу	36
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИРОБЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ВЕУ	38
2.1 Аналіз існуючих систем прогнозування генерації вітрових електростанцій	38
2.2 Обґрунтування застосування нечіткої логіки при проектуванні та експлуатації вітроенергетичних установок	39
2.3 Нечітка модель швидкості вітру.....	41
2.4 Вибір середовища програмування.....	43
2.5 Основи нечіткої логіки.....	43
2.6 Класифікація функцій приналежності	45
2.7 Короткі теоретичні відомості fuzzy logic toolbox математичного пакета matlab	47
2.8 Висновки до другого розділу.....	50
РОЗДІЛ 3 РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИРОБЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ВЕУ	51
3.1 Формалізація вхідних даних.....	51
3.2 Реалізація алгоритму для прогнозування.....	51
3.3 Висновки до третього розділу	64
Висновки.....	65
Перелік посилань	67

РЕФЕРАТ

Дипломна робота 72 с., рисунків 34, таблиць 16, літературних джерел 54.

Основні напрями досліджень: вітроенергетика.

Об'єкт дослідження – система управління вітроенергетичної установки.

Мета роботи – обґрунтування та реалізація моделі для прогнозування генерації вітрової енергії.

Методи дослідження – розробка та дослідження алгоритмів керування аеродинамічною підсистемою вітроенергетичної установки на основі теорії нечітких множин для вироблення оптимальної потужності.

Дипломна робота складається з трьох розділів. Перший розділі описано сучасний стан вітроенергетичних ресурсів на території України, оцінка вітрових ресурсів за показниками швидкості і напрямку вітру. Описано основні відомості вітроустановок.

Другий розділ присвячений огляду основних понять теорії нечітких множин та нечіткої логіки. Описано застосування нечіткої логіки при проектуванні та експлуатації вітроенергетичних установок. Використано моделювання у системі комп'ютерної математики MATLAB/Simulink/Fuzzy Logic Toolbox, де реалізовано модель трилопатної горизонтально-осьової ВЕУ.

Третій розділ – це висновок. В даному розділі сформовані основні результати дослідження та наведена їх оцінка з погляду виконання мети і завдань.

ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, ПРОГНОЗУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ВІТРУ,
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, НЕЧІТКА ЛОГІКА

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВЕ – відновлювана енергетика;

ВДЕ – відновлювальні джерела енергії;

ВЕУ – вітроенергетичні установки;

ВЕС – вітроелектрична станція;

Вт (МВт, ГВт) – одиниця виміру потужності;

м /с – одиниця виміру швидкості у Міжнародній системі одиниць (СІ)

MATLAB – скорочення від англ. "Matrix Laboratory", пакет прикладних програм для вирішення завдань технічних обчислень

НЛК – (правила бази знань) нечіткого логічного контролера

НЛ – нечітка логіка;

ІВЕ НАН України – Інститут відновлюваної енергетики НАН України;

IRENA – міжнародне агенство з відновлюваної енергетики;

ТНМ – теорії нечітких множин

ФП- функції приналежності

ВСТУП

Актуальність та цілі дослідження зумовлені тим, що енергія вітру є одним з найдешевших джерел серед відновлюваних джерел енергії для виробництва електроенергії у світі та в Україні. Сьогодні вітроенергетика займає перше місце за щорічним приростом електроенергії, випереджаючи природний газ і сонячну енергію. Розвиток вітроенергетики може значно зменшити забруднення навколишнього середовища та зменшити викиди CO₂ в атмосферу. Самовідновлюється природа енергії вітру робить це джерело невичерпним і володіє величезним потенціалом [1].

Невідкладним завданням є визначення вироблення енергії на основі розташування вітряних турбін або установки окремих вітряних турбін. Такий аналіз дозволить нам оцінити потенціал вітроенергетики. У цьому випадку, якщо швидкість вітру менше базового значення, повинна бути вироблена максимально можлива потужність, якщо швидкість вітру вище базового значення, потужність повинна бути обмежена номінальним значенням. Виникає питання про автоматичне регулювання потужності, що виробляється вітряною електростанцією, для забезпечення необхідної роботи в широкому діапазоні швидкостей вітру [2].

Кількість електроенергії, що виробляється вітровими електростанціями, залежить від багатьох факторів, включаючи швидкість вітру, час доби, погодні умови тощо.

Цілі регулювання потужності ВЕУ такі:

- вироблення максимально можливої потужності в умовах непостійності енергоносія - вітру;

Основні напрями досліджень: вітроенергетика.

Об'єкт дослідження – система управління вітроенергетичної установки.

Мета роботи – обґрунтування та реалізація моделі для прогнозування генерації вітрової енергії.

Методи дослідження – використання алгоритмів керування аеродинамічною підсистемою вітроенергетичної установки на основі теорії нечітких множин для вироблення оптимальної потужності.

В ході роботи над дипломною роботою був розроблений прототип математичної моделі на основі моделей, які вже використовуються для прогнозування вироблення електроенергії вітрогенератором.

Новизна: розроблена модель, що дозволяє застосовувати даний алгоритм до всіх типів місцевості.

В результаті роботи з розробки комп'ютерних моделей для імітаційного моделювання в середовищі MATLAB / Simulink в графічному режимі основної програми пакету Fuzzy Logic Toolbox – FIS – editor була сформована структура системи нечіткого виведення, обрані лінгвістичні змінні і набори їх значень, були визначені діапазон змін, тип і параметри функцій приналежності до лінгвістичних змінних, обраний алгоритм нечіткого виведення і сформована база правил нечіткого виведення. Для досягнення зазначеної мети в роботі вирішувались такі завдання:

- ознайомитись з використанням вітру в вітроенергетиці;
- встановити переваги та недоліки використання енергії вітру;
- ознайомитися з сучасним станом вітроенергетики України;
- дослідити стан вітру за швидкістю і напрямком в Україні;
- здійснити вибір вітроустановки;
- розглянути підходи до прогнозування генерації за допомогою штучного інтелекту;
- проаналізувати предметну область «нечітка логіка»;
- провести розробку реалізації алгоритму для прогнозування вироблення потужності вітроенергетичної установки (ВЕУ) у системі комп'ютерної математики MATLAB/Simulink/Fuzzy Logic Toolbox.

РОЗДІЛ 1 ВІТРОВА ЕНЕРГІЯ

1.1 Переваги вітрової енергії

Вітрова енергетика є галуззю альтернативної енергетики, в основі якої стоїть перетворення кінетичної енергії вітру в електричну енергію. Головним джерелом для вітрової енергетики є сонце, тому що саме воно впливає на виникнення вітру. Вітрова енергія, одне з найдешевших джерел поміж відновлюваних енергетичних джерел для виробництва електроенергії в Україні та світі [3].

Станом на нинішній час вітрова енергетика за потужністю річного електроенергетичного приросту займає перше місце, випереджаючи сонячну енергетику та природний газ [1].

Розвиток вітрової енергетики дає можливість зменшити забруднення навколишнього середовища та знизити викид до атмосфери речовини CO₂.

Самовідновлення цього джерела енергії зробило його невичерпним, в якому полягає великий потенціал [1].

Вітер є векторною величиною, яка характеризується двома елементами: напрямком по якому переміщується повітря та швидкість з якою воно це робить. Вітер це надзвичайно мінлива величина, яка може змінюватися в загальному спектрі часових і просторових масштабів, які об'єднують в собі, як сезонні так і міжрічні зміни, а також миттєві коливання тобто турбулентні пульсації [3]. Для найоптимальнішого використання вітрової енергії слід врахувати сезонну та добову змінюваність вітру, його швидкість залежно від висоти розташування над поверхнею землі, статистичні дані за визначений період, наприклад за останні 10 років, поривів вітру за короткий період час [3, 4].

Переваги вітрової енергетики [6]:

- екологічність та безпека;
- виробництво вітрової енергії не має викидів двоокису вуглецю;

- конкурентоздатність вітрової енергетики в порівнянні з газовою, ядерною та вугільною;
- відсутність витрат на паливо і його доставку;
- невичерпність вітру, як джерела енергії, що присутній в безмежній кількості;
- екологічність цього виду енергії;
- уникнення залежності від імпорту енергетичних ресурсів;
- модульність та легкий монтаж конструкцій;
- обсяг електричного постачання порівняний з традиційними методами генерації;
- відсутність загрози сільському господарству з боку вітрової енергетики.

Недоліки вітрової енергетики [6]:

- змінність швидкості вітру за короткі проміжки часу, а тому і енергії в часі;
- шумові впливи, обмеження розвитку вітроенергетики;
- потреба розташування вітрових установок в районах із високою інтенсивністю вітру;
- потреба в виведенні із експлуатації земель, які можна було б використовувати в інших видах господарської діяльності.

1.2 Сучасний стан вітроенергетики в Україні

В Україні дослідженням вітрової енергетики займається Інститут відновлювальної енергетики ІВЕ НАН України.

Вітрова енергетика перебуває на другому місці, відразу після сонячної енергетики, в національному секторі ВДЕ, за загальною встановленою потужністю [7].

Перед початком повномасштабного вторгнення в Україну генеруванням «зеленої» електроенергії займалися тридцять чотири вітрові електростанції (ВЕС) або 699 вітрові турбіни, середньо-одинична потужність яких становить 3,5 МВт. Вітрові електростанції знаходяться переважно в південних та південно-східних областях, найперше на узбережжі Чорного та Азовського моря - приблизно 85 % (рисунок 1.1) [7].



Рисунок 1.1 – Вітрові станції України станом на кінець 2021 року [7]

Лідером в Україні по встановленню вітрових електростанцій є Запорізька область [7–9]. Ботієвська вітрова електростанція є найбільшою за потужністю (200 МВт) в Україні. На другому місці – Херсонська, а третє посідає Миколаївська область [9].

Значна кількість вітрових електростанцій, які будуються в Україні є великими та забезпечують електроенергією цілі населені пункти [10].



Рисунок 1.2 – Найбільші вітрові електростанції в Україні [10]

Найбільші вітрові станції України знаходяться на узбережжі Азовського та Чорного моря. Вони працюють на вітрових турбінах від німецької компанії Fuhrlaender AG або датського виробника Vestas. Застосування ВЕУ дає змогу зменшити викидання шкідливих речовин до атмосфери на тисячі тонн вуглекислого газу в рік.

1.2.1 Потенціал потужності вітроелектростанцій України

Загальний потенціал вітрової енергетики України оцінюється Міжнародним агентством з відновлюваної енергетики (IRENA).

На території України природна зона та її площа є початковими даними для оцінки потенціалу потужності ВЕС.

Відсоток вітроенергетичних потужностей, що були використані при експлуатації на 2021 рік, складав 30,6 або 358,8 МВт, це в 2,5 рази більше за кількість нових авторових енергетичних потужностей, які були введені у 2020

році (144,2 МВт). З цих даних ми бачимо, що загальна встановлена потужність вітрового енергетичного сектору в кінці 2021 році склала 1 672,9 МВт [7].



Рисунок. 1.3 Встановлена вітроенергетична потужність, МВт. ГС «УВЕА», НКРЕКП, 2021



Рисунок 1.4 – Встановлена потужність об'єктів ВДЕ [7]

В Одеській та Запорізькій області були збудовані нові вітроенергетичні установки потужностями 40 МВт та 98 МВт відповідно. Одне з останніх місць по встановленню ВЕС в Україні залишається Сумська область та стоїть на 22 місці [11].

На рисунку 1.5 зображена потужність об'єктів ВЕС по регіонам за перший квартал 2018 року. Перше місце по введенню в роботу ВЕС в першому кварталі 2018 році займала Херсонська область.

Середня та мала вітрові генерації, в число яких входять вітрові енергетичні установки потужністю від 20 до 500 кВт та до 20 відповідно. Ці ВЕУ мають великі перспективи в Україні проте розвивалися дуже повільно, через бюрократичні питання та неналежне визначення пріоритетів [7].

Область	ВЕС		Комбіновані (ВЕС+СЕС)	
	Кількість станом на 01.01.2022	Встановлена потужність генеруючих установок (МВт) станом на 01.01.2022	Кількість станом на 01.01.2022	Встановлена потужність генеруючої установки (МВт) станом на 01.01.2022
Всього по Україні	4	0,057	8	0,264
Волинська область	1	0,02		
Дніпропетровська область	1	0,03	1	0,05
Донецька область			1	0,0242
Закарпатська область	1	0,004		
Кіровоградська область			1	0,05
Миколаївська область			1	0,05
Сумська область			1	0,05
Тернопільська область			2	0,01
Херсонська область	1	0,003		
Київська область			1	0,03

Рисунок. 1.5 Вітроустановки та комбіновані станції, які отримують «зелений» тариф, станом на 31 грудня 2021 року ГС «УВЕА», Держенергоефективності 2021

1.2.2 Український сектор вітрової енергетики в умовах війни

Війна, яку Росія розпочала проти України, призвела до масштабної енергетичної кризи. За останні роки Україна втратила свій потенціал у галузі вітроенергетики.

Загальна встановлена потужність на кінець 2021 року становила 1672,9 МВт. У 2022 році Україна планувала ввести в експлуатацію щонайменше 1 ГВт нових вітрових потужностей. Наразі ці проекти, які вже перебували на стадії розробки або будівництва, призупинені [7], а 85% діючих ВЕС розташовані на окупованих Російською Федерацією територіях або зупинені для збереження своїх потужностей.

Обстріли росіянами української енергетичної інфраструктури тривають із жовтня 2022 року. Щодня об'єкти електроенергетики по всій

Україні піддаються загрозі обстрілів. Значна частина інфраструктури була пошкоджена. Вже є п'ять відомих турбін, які не підлягають відновленню: це чотири турбіни на Мирненській та Новотроїцькій ВЕС (Віндкрафт) та одна турбіна на Сивашській ВЕС (рис. 1.6) [12, 13].



Палаюча вітрова турбіна потужністю 4 МВт на Сиваській ВЕС, 25 лютого 2022 року, Херсонська область

Рисунок. 1.6 – Палаюча вітрова турбіна потужністю 4 МВт на Сиваській ВЕС, 25 лютого 2022 року, Херсонська область [12].

В загальному генерація енергії вітру впала більше ніж в два рази в порівнянні з її довоєнним рівнем. Це можна пояснити двома чинниками. В першу чергу, внаслідок безпосередніх бойових дій, або через запобігання пошкодженню електричного устаткування. Друга проблема - це посилення питання, пов'язаного із падінням попиту і високою негнучкістю генерації, що підлягає диспетчеризації

29 листопада 2023 року Андрій Конеченков, голова правління Української вітроенергетичної асоціації (УВЕА), розповів про поточний стан справ у вітроенергетиці та зміни, які сприятимуть її розвитку для української енергетики [11]: Сьогодні в Україні встановлено 1860 МВт вітроенергетичних потужностей. З них на тимчасово окупованих територіях у Херсонській,

Запорізькій, Донецькій та Луганській областях зараз розміщено 1317 МВт потужності, або 71% від її загального обсягу. Основні підконтрольні станції розташовані в Миколаївській, Одеській та Львівській областях. У Тернопільській та Івано-Франківській областях було встановлено ще кілька невеликих станцій, кожна з двох-трьох турбінами, які раніше діяли [13]

З парків, які працюють у великій вітроенергетичній галузі для живлення мережі, я можу назвати три станції в Одеській області. Це «Южне Енерджі», Дністровська ВЕС та Овідіопольська ВЕС турецької компанії Guris [13].

На Львівщині зараз працюють перша та друга черги ВЕС «Старий Самбір». У грудні цього року запрацюють вітрогенератори Сколівської ВЕС потужністю 54,5 МВт. В Одеській області до війни на Дністровському ВЕС було побудовано 40 МВт потужностей, ще 60 МВт – під час бойових дій. У Миколаївській області у 2023 році введено в експлуатацію першу чергу Тилігульської ВЕС потужністю 114 МВт (рис. 1.7). Крім того, ми припускаємо, що ця станція досягне заявленої потужності 500 МВт у 2024-2025 роках [13].



Рисунок 1.7 – Тилігульська ВЕС, побудована компанією ДТЕК ВДЕ у Миколаївській області. Фото: надано УВЕА

За ці майже два роки війни було добудовано три ВЕУ загальною потужністю 228,5 МВт.



Рисунок 1.8 – Вітрова станція "Старий Самбір" у Львівській області, побудована компанією "ЕКО-ОПТИМА". Фото надано УВЕА

Ситуація з потужностями на окупованій Російською Федерацією території дуже складна. Маємо інформацію про пошкодження шести турбін у Херсонській області та чотирьох у Миколаївській. Це означає, що наразі підтверджено, що десять турбін були зупинені [13].

Проте, незважаючи на війну та тимчасову втрату двох третин своїх потужностей через перебування на окупованій території, українська вітроенергетика робить великі кроки у своєму розвитку. «Були спроби росіян відновити роботу ВЕС на користь Російської Федерації. Однак зробити це їм не вдалося, оскільки це сучасні технології, які контролюються виробниками пристроїв через Інтернет. Якщо територія буде розчищена найближчим часом, то не менше 50% потужностей буде повернуто в роботу досить швидко, решту доведеться відновлювати та замінювати пошкоджені компоненти», — повідомив голова ради директорів громадської спілки «Українська вітроенергетична асоціація» (УВЕА) Андрій Конеченков Укрінформу з [14].

Поточний стан генеруючих потужностей в Україні у наслідок повномасштабного вторгнення (станом на квітень 2023)¹



Рисунок 1.9 – Стан генеруючих потужностей України: презентація Дослідження пропозицій бізнесу та держави

Андрій Конеченков вважає, що порятунком від енергетичного шантажу Російської Федерації є відновлювані джерела енергії, а саме вітрова, а значить, за словами Андрія Конеченкова, «зелена» енергетика має стояти на першому місці у відновленні післявоєнної української енергетики. Одним із інструментів досягнення цієї мети є розвиток транскордонних взаємозв'язків. За словами керівника УВЕА, Україна здатна до 2030 року досягти 50% виробництва електроенергії з відновлюваних джерел енергії в енергетичному балансі [12] роенергетична асоціація» (УВЕА) Андрій Конеченков Укрінформу з [14].

1.3. Географічне зонування – основа оцінки вітрового потенціалу України

В ІВЕ (Інститут відновлюваної енергетики) НАН (Національна академія наук) України був запропонований географічний підхід щодо оцінення технічно - досяжного вітрового потенціалу (ТДВП) територій України. В цьому підході забезпечується точність оцінки технічно - досяжного

вітрового потенціалу, є значно легшим та потребує значно меншого витрачання фінансів та часу, ніж пропонують інші підходи [3].

Кліматологічне оцінювання та районування території за вітровим енергетичним потенціалом є першочерговим підготовчим кроком на шляху до визначення оптимального місця розміщення ВЕУ [15, 16].

До кліматичної інформації, що використовується з цією метою, відносять: осереднену за багаторічний період швидкість вітру, добовий хід швидкості у різні сезони року, повторюваність по градаціях у різні сезони та місяці року, вертикальні профілі й коефіцієнти зміни швидкості вітру під впливом неоднорідності підстильної поверхні [17, 18].

Територія суходолу України за природними умовами поділяється на чотири природні зони (рисунок 1.10) [19]. Для кожної природної зони є притаманними свої однорідні географічні умови.



Рисунок. 1.10 – Карта природних зон України [19]

В загальному на території України придатними для будівництва ВЕС вважаються території площею до 7 тис. км². За розрахунками науковців, при максимальному використанні сили вітру в цих регіонах можна було б

одержувати електроенергію в обсягах, які б надавали можливість забезпечити до 50 % загального енергоспоживання країни [20].

Найбільш доцільною для реалізації таких проектів є степова зона України. Регіони степової зони є низько продуктивними для землеробства, але повністю придатними та економічно вигідними для ВЕС, становлять 10 000 тис га. Це – АР Крим та Миколаївська, Херсонська, Запорізька і Луганська області [3].

Найвищим вітровим енергетичним потенціалом відзначаються узбережжя Чорного та Азовського морів, Південний берег Криму, вершини Карпатських та Кримських гір. Умови використання вітру оптимальні протягом усього року. Будівництво вітрових електростанцій треба розгортати у цих регіонах, враховуючи значний дефіцит власних виробничих потужностей. Можливе ефективне розміщення як потужних вітроелектростанцій, так і автономних вітрових енергетичних установок [17].

Особливу увагу приділяють також вивченню енергетичного потенціалу територій з місцевими вітрами. Важливо віддати перевагу будівництву вітрових електростанцій на прилеглих водних акваторіях, що мають особливо високий вітровий енергетичний потенціал, а саме узбережжя акваторій, що характеризуються бризовою циркуляцією є перспективними для вітрової енергетики через порівняно стабільний режим швидкості вітру. Це перш за все, мілководні території морської шельфової зони, які можуть мати у 2,5-3 рази вищий вітровий енергетичний потенціал в порівнянні з відкритими ділянками узбережжя [18].

Мілководні території акваторій Чорного та Азовського морів, Дніпровського каскаду і Дністровських водосховищ, затоки Сиваш дозволяють будувати економічно ефективні офшорні ВЕС (рисунок 1.11) [3].

Високий потенціал вітрової енергії притаманний району Донецької височини, Приазовської та Причорноморської низовин. Тут на протязі року сприятливі умови для використання вітру та ефективної роботи потужних

вітрових електростанцій та автономних вітрових енергетичних установок. [21].



Рисунок. 1.11 - Карта основних акваторій території України [3]

В повній мірі вітровим енергетичним потенціалом відзначаються також Подільська та Придніпровська височини. Умови вітрового використання більш ніж сприятливі, особливо у холодний період року [17].

Поліська та Придніпровська низовини характеризуються невисоким вітровим потенціалом та нерівномірним його розподілом протягом року. Умови використання вітру менш сприятливі, рекомендується розміщення тихохідних вітрових енергетичних установок, потреба у яких підвищуватиметься у холодний період року [17].

Передкарпаття, Закарпаття та вузькі захищені долини Карпат та Кримських гір відзначаються низьким вітровим потенціалом. Умови вітрового використання несприятливі, за винятком окремих місць, які значно домінують над навколишньою місцевістю [17].

1.3.1 Кліматичні ресурси вітрової енергії в Україні

Для оцінки вітрових ресурсів найбільш важливими показниками є швидкість та напрям вітру [3, 23]. Сила та напрям вітру у різних зонах різняться залежно від висоти над землею поверхнею [24]. Середня швидкість вітру. Основною характеристикою вітру, що визначає його інтенсивність та ефективність використання вітрової енергії, являється його середня швидкість за певний період часу, наприклад, за добу, місяць, рік чи кілька років. Середня швидкість вітру представляється як середнє арифметичне значення, отримане з низки вимірів швидкості, зроблене через рівні інтервали часу протягом заданого періоду [24].

В таблиці 1.1 [6] наведена середньорічна швидкість вітру, м/с, на висоті 50 м над поверхнею землі при різних географічних характеристиках місцевості.

Таблиця 1.1 – Середньорічні швидкості вітру, м/с, і питомі валові потенціали ВЕ, кВт·год/(м²·рік) [7].

Закрита місцевість		Відкрита місцевість		Морський берег		Відкрите море		Пагорби і гори	
V	W _{пит.в}	V	W _{пит.в}	V	W _{пит.в}	V	W _{пит.в}	V	W _{пит.в}
>6,0	>110	>7,5	>220	>8,5	>310	>9,0	>350	>11,5	>790
5-6<0	66-110	6,5-7,5	130-220	7,0-8,5	180-310	8,0-9,9	260-350	10-11,5	530-790
4,4-5,0	44 – 66	5,5-6,5	88-130	6,0-7,0	110-180	7,8-8,0	180-260	8,5-10	310-530
3,5-4,5	22-44	4,5-5,5	44-88	5,0-6,0	66-110	5,5-7,0	88-180	7,0-8,5	180-310
<3,5	<22	4,5	<44	<5,0	<66	<5,5	<88	<7,0	<180

Середньорічну швидкість вітру, а також напрям вітру можна отримати з карти вітрів України (рис. 1.12), яка дає змогу наочно оцінити вітроенергетичний потенціал окремих вітрових районів України.

Проаналізувавши рисунок 1.12, можна зробити висновок, що середньорічна швидкість вітру по всій території України коливається від 3 до

6 м/с, а на південному узбережжі Чорного моря, на Керченському півострові та в Карпатах. Великий вплив на швидкість вітру мають ліси, тому найменша вірогідність швидкості вітру понад 3,6 м/с (60%) спостерігається на Поліссі. Помітне зниження швидкості вітру характерне також для Південного берега Криму та в районах Закарпаття, захищених Карпатами [22].

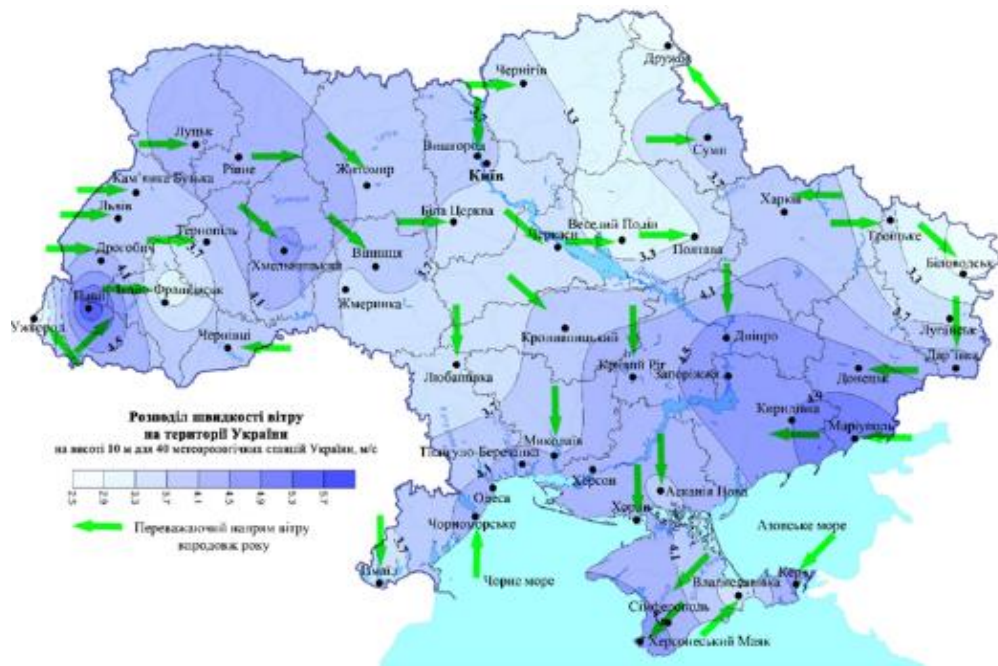


Рисунок 1.12 – Розподіл швидкості зон України вітру на території України [20]

Класи відкритості місцевості та наведена середня швидкість. При використанні даних метеоспостережень про середню швидкість вітру потрібно враховувати, що вони відповідають конкретним рельєфним та ландшафтним умовам в районі метеостанції та певній висоті над поверхнею Землі (висота флюгера). Для різних станцій ці умови можуть певною мірою відрізнятися. Тому взято приведення середньої багаторічної швидкості вітру до порівнянних умов щодо відкритості та рівності місцевості [26].

Згідно з методикою європейської практики будівництва вітрових станцій, місцевості, придатні для розміщення вітрових агрегатів поділяються

на декілька класів (згідно з типами рельєфу) (10 балів – відсутність нерівностей, тобто нульовий клас поверхні) таблиця 1.4 [4].

Таблиця 1.2 – Класифікація вітрового потенціалу місцевостей за особливостями нерівностей

Клас нерівності	Типографія місцевості	Енергопотенціал, кВт·год / м ² рік
1	Відкрита місцевість без високої рослинності та лісів	6,8
2	Окремі будинки, відстань між ними – 1000 м	4,6
3	Забудований район, ліси, пересічена місцевість	2,4

Оцінка енергетичної забезпеченості в балах залежно від особливостей місцевості не завжди є однаковою. Відомо, що після забудови місцевості або після насадження там дерев аеродинаміка цієї місцевості різко змінюється збільшується кількість вітрового часу й зростає сила вітру [4].

Стосується це також і гірської місцевості. Незважаючи на значні захаращення в окремих місцях, пересіченість місцевості може утворювати щось подібне до каналів, у яких швидкість вітру набагато більша, ніж на відкритій місцевості [4].

Залежність середньої швидкості вітру від висоти. При встановленому вітровому потоці швидкість вітру зростає зі збільшенням висоти над поверхнею Землі. Зазвичай прилади, що реєструють, на метеостанціях розташовуються на висотах 9-20 м. В цей самий час осі сучасних ВЕУ знаходяться на різних висотах в приземному шарі товщиною -100 м; є навіть пропозиції щодо розміщення ВЕУ на аеростатах. Тому з метою оцінки ефективності використання вітрового потоку необхідно встановлення вертикального профілю швидкостей вітру [26].

Для кожної місцевості зміна швидкості вітру за висотою має характерний вигляд (рис. 1.13) [4].

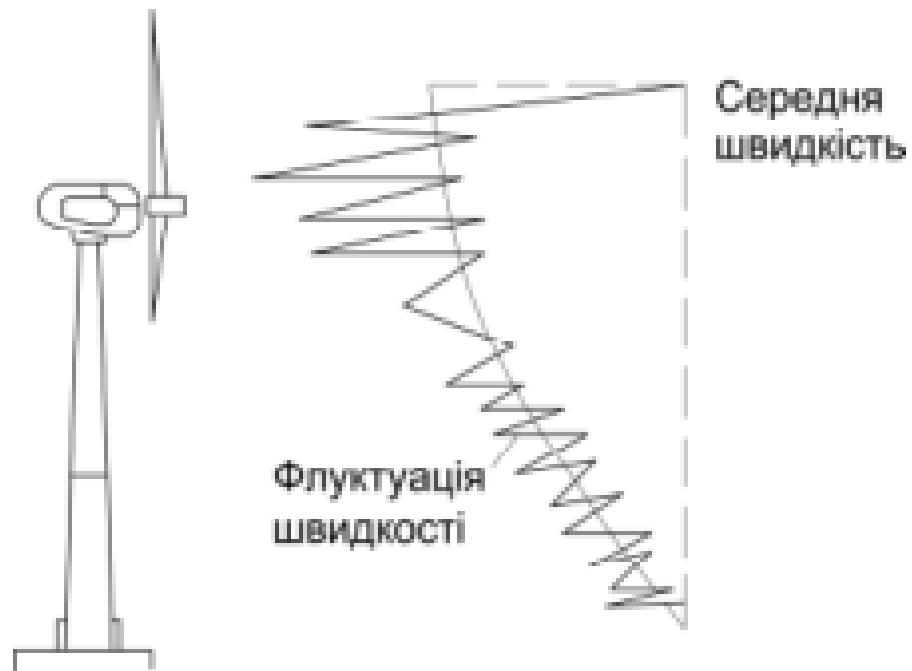


Рисунок 1.13 – Епюра швидкостей вітру [4]

Із рисунка 1.13 випливає, що крім середньорічної швидкості кожна місцевість має свій профіль швидкостей, який обумовлює величину швидкісного напору. Із огляду на це для ефективного уловлювання вітру вираховують оптимальну висоту розташування вітрового агрегату над рівнем землі. Як і для середньорічної швидкості, спочатку досліджують ефективну висоту розташування вітрового агрегату за різних вітрових навантажень та потужностей самого вітрового агрегату [4]. науковцями встановлено, що на висоті 60-80 м середня швидкість вітру зростає майже в 1,5 рази. ВЕУ великої потужності з високою вежею буде набагато продуктивнішою, ніж ВЕУ малої потужності розташована на висоті флюгера 10-14 м.

Енергетичні установки зазвичай використовують вітер у приземному шарі на висоті до 50...70 м, рідше - до 100...150 м від поверхні Землі, тому найбільший інтерес представляють характеристики руху повітряних потоків саме в цьому шарі [19, 27]. На рис 1.14. представлено карту середньорічної швидкості вітру в Запорізької області для висоти 100 м над рівнем земної поверхні.

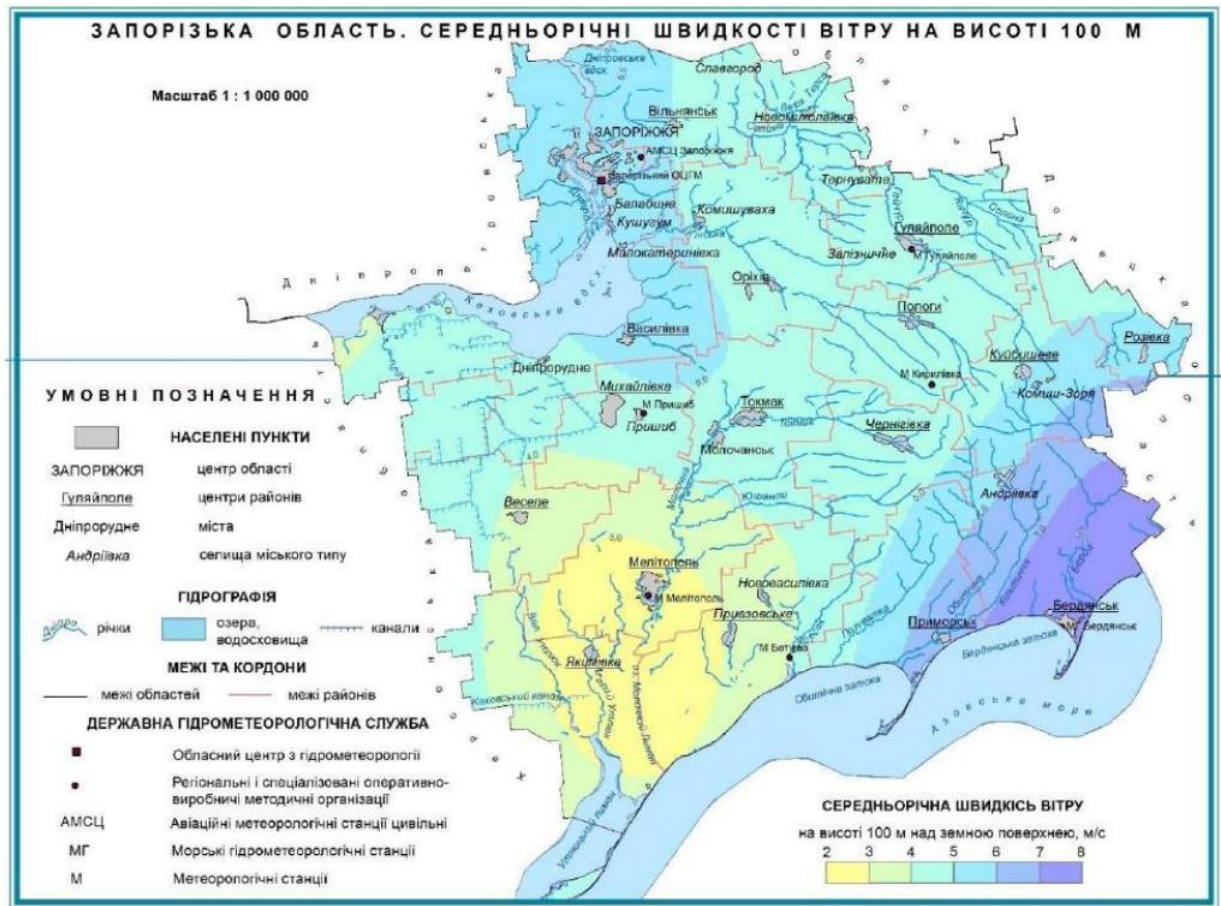


Рис.1.14 – Середньорічної швидкості вітру в Запорізькій області для висоти 100 м над рівнем земної поверхні [27]

Розподіл вітроенергетичних характеристик по сезонах:

Характеристики тимчасової залежності середньої швидкості вітру по сезонах мають важливе значення для оцінки не тільки вітроенергетичного потенціала певної місцевості, а й ефективності його використання за рахунок обліку ступеня узгодженості графіка надходження вітрової енергії з графіком енергетичного навантаження споживачів.

Характерною особливістю вітрової обстановки є сезонна нерівномірність швидкостей вітру, що відповідає тому, що інтенсивність вітру в осінні та зимові місяці значно вищі, ніж у літні. Дані, представлені на рисунках 1.15-1.16 показують, що середньомісячна швидкість вітру зимою більш ніж у 2 рази перевищує середньомісячну швидкість вітру влітку, причому абсолютна різниця швидкостей становить понад 6 м/с. Максимум

середньомісячних швидкостей вітру можна спостерігати у південно-східній частині України, в приморських районах і в долині Дніпра (швидкість вітру на берегах водосховищ і біля них на 20-50% більша, ніж у віддаленні від водойм на рівнині). У гірських районах Українських Карпат на узбережжі Чорного та Азовського морів середня швидкість вітру 7-8 м/с. Це пов'язано з появою великих температурних контрастів між північними і південними широтами, при цьому ймовірність швидкості вітру понад 3,5 м/с у прибережних районах досягає 70% і більше (середня швидкість вітру в цей період до 8 м/с). У теплу пору року швидкість вітру значно зменшується. Максимальна ймовірність вітру понад 3,5 м/с (60%) спостерігається лише в прибережних районах.

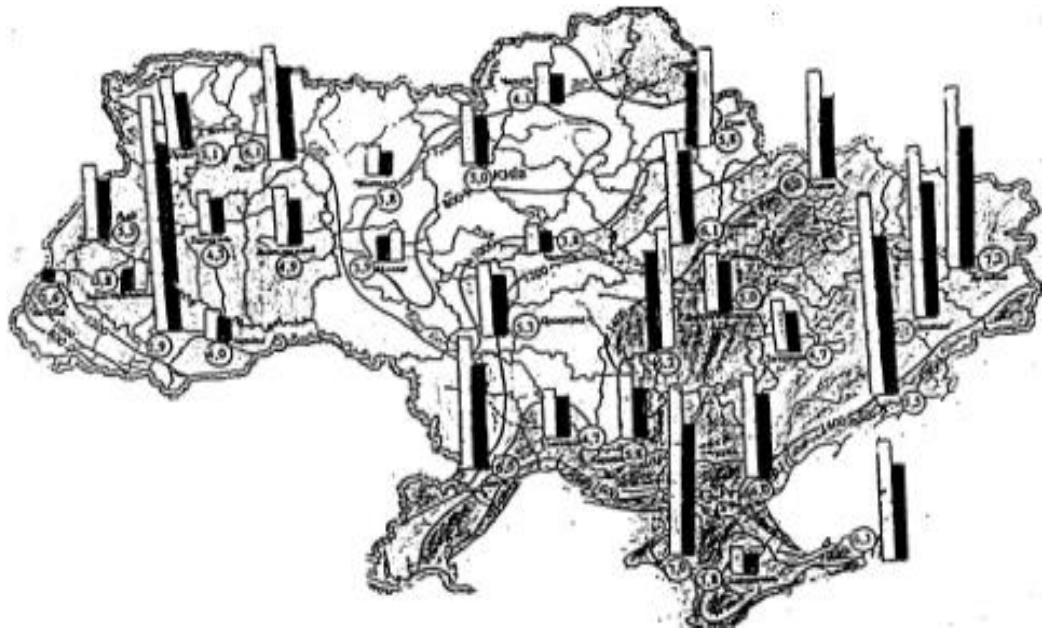


Рис 1.15 – Енергетичні ресурси вітру взимку [17]

Енергетичні ресурси вітру (зима): 800 – тривалість робочої швидкості вітру; – середня швидкість вітру на висоті 16 м від поверхні землі (м/с); - питома потужність вітрової енергії (Вт/м²); – кількість потенційної вироблюваної енергії (МДж/м²/сезон) [17].

Улітку енергетичні ресурси вітру найменші. Це відбувається влітку, і швидкість в середньому на 1-2 м/с вище вдень, ніж вночі, що є сприятливим для ефективного використання вітру, оскільки максимальне споживання енергії також відбувається вдень. Річний профіль середньої швидкості вітру на

висоті 16 м на Закарпатті та півночі України становить 2,5-3,5 м/с, на сході та півдні цей показник зростає до 4,5-5,5 м/с (рис.1.16)



Рис. 1.16 – Енергетичні ресурси вітру улітку [17].

Енергетичні ресурси вітру (літо): 600 – тривалість робочої швидкості вітру; – середня швидкість вітру на висоті 16 м від поверхні землі (м/с); – питома потужність вітрової енергії (Вт/м²); – кількість потенційної вироблюваної енергії (МДж/м²/сезон) [17].

1.3.2 Районування території України за потенціалом вітрової енергії.

Завдання за визначенням режиму повторюваності швидкостей вітру є досить трудомісткими, оскільки пов'язана з необхідністю обробітки багаторічних рядів спостережень. Трудомісткість розрахунків знижується при використанні матеріалів метеорологічних щомісячників, які випускаються гідрометеорологічною службою. У них початкова інформація про швидкості вітру вже піддана первинній обробці, і дані про повторюваність швидкостей приведені у виді таблиць. Чисельні значення фактичної повторюваності швидкостей вітри, отримані за даними метеорологічних щомісячників представлені по градаціях, прийнятих гідрометеорологічною службою тобто в

діапазоні швидкостей до 18 м/с по 2-метрових інтервалах, а в області вищих і рідше спостережуваних швидкостей - по 3 -, 4 - і 6 метровим інтервалам. Районування режимів повторюваності швидкостей вітру зводиться до виявлення розташувань метеостанцій. Статистичні характеристики швидкості вітру залежать від особливостей місцевих умов рельєфу, висоти.

В таблиці 1.3 наведені показники районування території України за потенціалом вітрової енергії які дають змогу оцінити енергетичні ресурси того чи іншого району та зробити висновок про доцільність їх використання.

Вихідними параметрами для виконання районування служили значення середньої річної багаторічної швидкості вітру, наведені до умов відкритої місцевості на плоских або опуклих формах рельєфу на висоті 10 м від землі. Спочатку територію України було поділено на п'ять вітрових зон з використанням даних середньорічної швидкості вітру.

Таблиця 1.3 – Районування території України за потенціалом вітрової енергії

Район	Середня річна швидкість вітру, м/с	Оцінка потенціалу вітрової енергії
Узбережжя Чорного і Азовського морів, Південний берег Криму, вершини Українських Карпат, Кримських гір	5,5-6,5	Оцінка потенціалу вітрової енергії
Донецька височина, Приазовська та Причорноморська Низовини	5,0-6,0	Високий потенціал. Сприятливі умови вітровикористання
Подільська та Придніпровська височини	4,0-5,0	Достатній потенціал. Досить сприятливі умови
Поліська та Придніпровська низовини, Волинська височина	3,0-4,5	Невисокий потенціал. Обмежено сприятливі умови
Передкарпатт, Закарпатська низовина, долини Українських Карпат, Кримських Гір	1,5-2,5	Низький потенціал. Несприятливі умови вітровикористання.

Районування території України за вітроенергетичним потенціалом проводилося на основі кліматичного узагальнення цих показників. Вибір був зроблений виходячи з принципу їх репрезентативності як характеристик довгострокового вітроенергетичного режиму і його просторово-часової структури. Для зонування території був застосований набір показників:

- середня річна швидкість вітру (дає загальне уявлення про кліматичний вітроенергетичний потенціал будь-якого району) та її мінливість;
- питома потужність та сумарні потенційні вітрові енергетичні ресурси і утилізована вітрова енергія;
- тривалість енергоактивної швидкості вітру та енергетичного штилю;
- безперервна тривалість робочої швидкості (як критерій стабільності функціонування вітроагрегатів).

1.4 Вітроенергетичні установки

Сучасна вітряна турбіна є складною машиною з ротором аеродинамічної конструкції та ефективними компонентами вироблення, передачі та регулювання енергії. Розмір цих турбін коливається від кількох ватів до кількох мегаватів. Сучасна тенденція у вітроенергетиці полягає у переході на більші установки потужністю в кілька МВт, оскільки масштабування системи може знизити собівартість одиниці електроенергії, що виробляється вітром.

Використання вітрових турбін є однією з нових технологій, Використовують поновлювані джерела енергії. Розвиток даних технологій почався в 1980-х роках з вітряних турбін потужністю декількох десятків кВт і нині сягає кількох МВт. Таким чином, використання кінетичної енергії вітру спочатку не мало жодного впливу на енергосистеми, але зі зростанням потужностей та різних систем управління вітроелектростанції можуть

активніше використовуватися для електропостачання споживачів. Засновані на перетворенні кінетичної енергії на електрику, вітрогенератори стали відмінним виходом при електропостачанні.

Вітрова установка перетворює в корисну роботу лише частину енергії. Сучасні вітродвигуни при роботі в найбільш ефективному режимі перетворюють в механічну роботу до 50% кінетичної енергії вітрового потоку за даними у [1, 6, 18], причому ця частка не може перевищувати теоретичне порогове значення, яке становить 59.3% (закон Беца) [6, 28, 29].

Дане принципове обмеження зумовлене тим, що умовою роботи установки є відведення потоку повітря за нею, а це означає втрату кінетичної енергії потоку, яка потенційно могла би бути утилізованою [29].

Енергія вітру може бути утилізована лише у певному швидкісному діапазоні, що визначається трьома важливими технічними характеристиками вітрової установки [8, 30, 31]: стартова (cut-in speed), номінальна (rated speed) та максимально робоча (cut-out speed) швидкості вітру. Більшість ВЕУ працюють в діапазоні швидкостей від 3 до 25 м/с.

Номінальна швидкість залежить від технічної складової установки (здебільшого від її потужності) і для промислових установок становить в середньому 12–16 м/с [28]. Найбільша ефективність роботи ВЕУ при швидкості вітру рівній або більшій номінальній [30].

Існує два основні види установок: вітроустановки з горизонтальною віссю обертання (рис. 1.17) та вітроустановки із вертикальною віссю обертання [4].

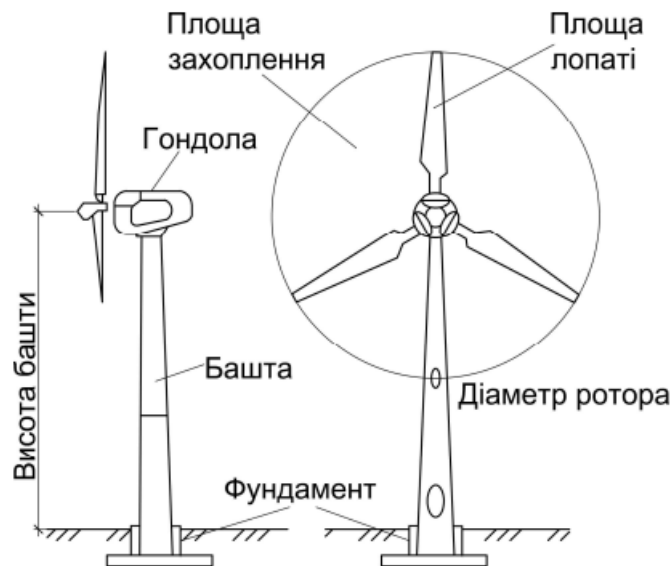


Рисунок 1.17 – Принципова схема вітроустановки [4]

Кількість лопатей вітроколеса буває різною. Найбільш поширені трилопатеві колеса.

У місцевостях з переважанням вітру одного напрямку ВЕУ будують з фіксованим становищем вітроколеса, в інших районах система має можливість повертатись за вітром. У промислових ВЕУ напрямом управляє електроніка. Сучасна потужна вітроенергетична установка повністю автоматизована з використанням найсучаснішої елементної бази, комп'ютерної техніки та програм. Всі основні операції здійснюються без участі людини. [8]:

Промисловий вітрогенератор доповнюється високою вежею з фундаментом, поворотним механізмом, керованим електронікою, гальмівною системою, системою зміни кута атаки лопатей, блискавкозахистом, системами пожежогасіння та зв'язку.

Щоб уберегти ВЕУ від ураганного вітру, ці питання вирішується різними методами, починаючи від автоматичного складання лопатей до виготовлення спеціальних клапанів, що не дають бурі зруйнувати вітрогенератор.

Горизонтально-осьові вітро двигуни в порівнянні з вертикально - осьовими мають наступні переваги [6, 8]:

- можливість самостійного пуску без допоміжного приводу за рахунок зміни кута установки лопатей;
- більшого значення коефіцієнта використання енергії вітру;
- більшого значення коефіцієнта швидкохідності X_i , як наслідок цього, велику частоту обертання вітродвигуна, що дозволяє зменшити малогабаритні показники електромеханічного обладнання;
- виключення необхідності в кутовій передачі обертового моменту.

До основного недоліку горизонтально-осьових двигунів слід віднести необхідність в пристрої орієнтації на напрямок вітру.

Українські вітрові парки працюють на найсучасніших вітротурбінах: генеруватимуть електроенергію завдяки американським «General Electric» [32] та данських «Vestas». Найбільшого поширення набули трилопатеві вітроенергетичні установки з горизонтальною віссю обертання. Роботами датських учених було показано, що для потужних ВЕУ найбільш доцільними є 3-х лопатні вітроколеса, що забезпечують плавність обертання та мінімізуючі моменти, що впливають на вісь вітроколеса. Вони вважаються більш ефективними зважаючи на високий коефіцієнт використання енергії вітру 0,35...0,45, мають достатній пусковий момент і легко розкручуються, включаючись в роботу при швидкостях вітру 3...5 м/с [6, 8].

Вони починають працювати при швидкості вітру від 3,5 м/с і мають потужність більш ніж 3 МВт. Очікується початок застосування вітрових турбін потужністю 4 МВт і вище. За прогнозом Інституту відновлюваної енергетики НАН України, до 2030 року в Україні будуть побудовані вітрові електростанції потужністю понад 10 ГВт [32].

На даний час на більшості діючих вітрових електричних станцій впроваджуються в експлуатацію ВЕС третього покоління, номінальна потужність яких починається від 1 МВт, це Vestas V112, Fuhrlander FL2500-100 [33].

Основні параметри сучасних вітрових електроустановок наведено в таблиці 1.4; 1.6.

Таблиця 1.4 – Технічні дані ветротубини FL 2500/100 [32].

Виробник	Fuhrländer(Аллемань)
Номінальна потужність	2500 кВт
Мінімальна швидкість вітру (запуск ВЕУ)	3.5 м/с
Номінальна швидкість вітру (робота у номінальному режимі)	11,5 м/с
Максимальна швидкість вітру (зупинення ВЕУ)	25 м/с
Діаметр ротора	100 м
Площа вітроколеса	7,854 м ²
Висота опори	100 м

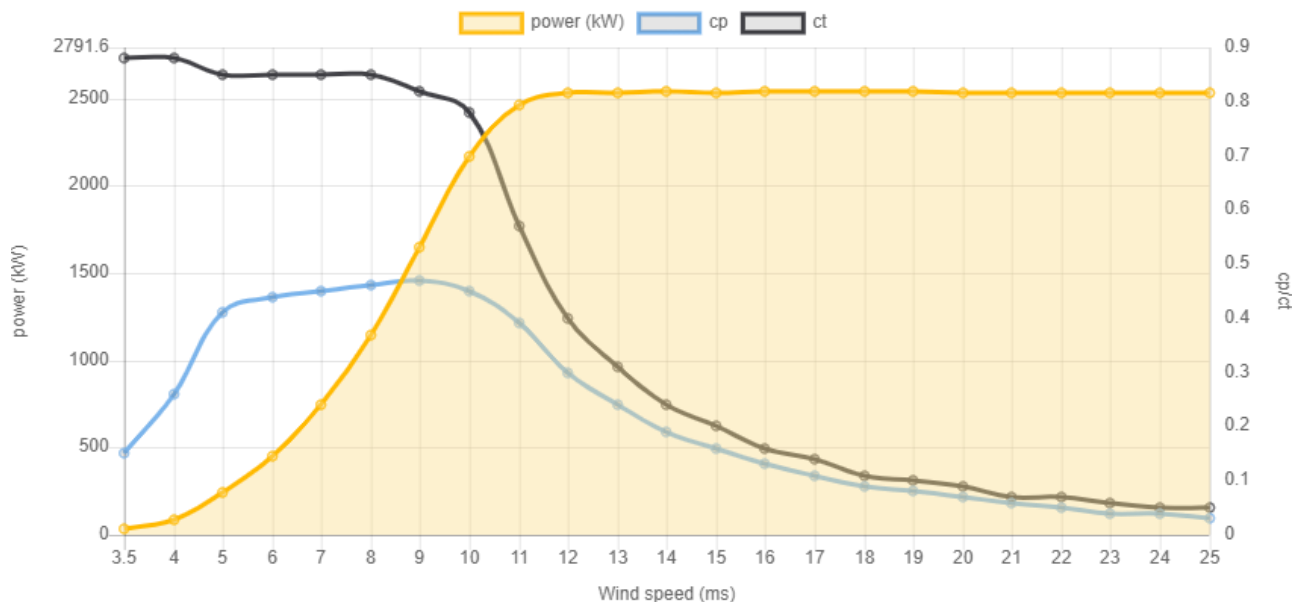


Рисунок 1.18 – Крива потужності [32]

Номінальна потужність Fuhrländer FL 2500/100 складає 2,50 МВт. Як видно, вироблення потужності починається з позначки швидкості вітру 3,5 м/с і є стартовою позицією в процесі виробітку

У таблиці 1.5 показано можливість аналітичного використання кривої потужності ВЕУ з використанням значень кута встановлення лопатей та швидкохідності ВК [35].

Таблиця 1.5 – Потужність генерації (паспортна) електроенергії вітряної Fuhrländer FL 2500/100 турбіни

Швидкість вітру v , м/с	Потужність генерації P (паспортна) кВт	Кут установки лопаті β , град	Кутова швидкість обертання ВК ω , об/хв
3	0	0,56	8,93
4	81	-0,05	8,93
5	229	-0,33	9,2
6	439	-0,38	9,82
7	712	-0,79	11,18
8	1103	-1,33	12,79
9	1552	-1,44	13,87
10	2036	-1,39	14,04
11	2355	-0,92	14,08
12	2462	1,59	14,37
13	2500	4,31	14,52
14	2500	6,75	14,56
15	2500	8,53	14,54
16	2500	10,14	14,48
17	2500	11,94	14,48
18	2500	12,91	14,51
19	2500	14,39	14,44

В діапазоні швидкостей від 3.5 м/с до 11,5 м/с йде вироблення номінальної потужності. Починаючи з 11.5 м/с до 25 м/с потужність підтримується на номінальному рівні. Вище останньої позначки спрацьовує команда відключення установки з метою безпеки.

Вітрогенератор Vestas B112/3300

Vestas B112/3300 з 2014 по 2019 рік був найпотужнішим серійним вітрогенератором у світі.

Таблиця 1.6 – Технічні дані ветротубини Vestas B112/3300

Виробник	Vestas(Дания)
Номінальна потужність	3075 кВт
Мінімальна швидкість вітру (запуск ВЕУ)	3 м/с
Номінальна швидкість вітру (робота у номінальному режимі)	13 м/с
Максимальна швидкість вітру (зупинення ВЕУ)	25 м/с
Діаметр ротора	112 м
Площа вітроколеса	9,852 м ²
Висота опори	84; 94; 119 м

Кривая мощности

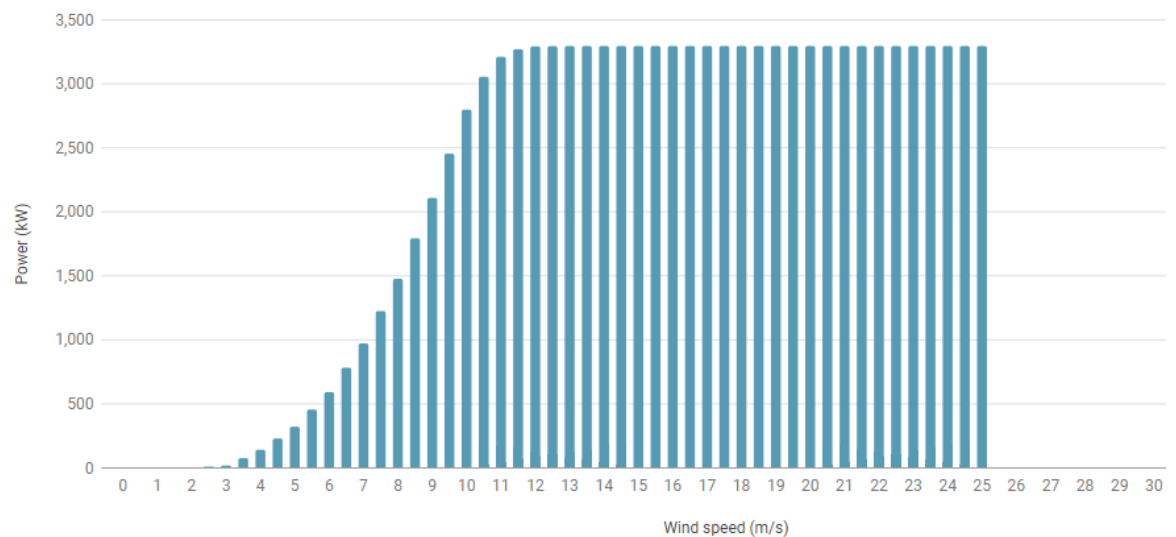


Рисунок.1.19 – Крива потужності [37]

Вироблення потужності починається з позначки швидкості вітру 3 м/с і є стартовою позицією в процесі виробітку. У діапазоні швидкостей від 3 до 13 м/с йде вироблення номінальної потужності. Починаючи з 13 до 25 м/с, потужність підтримується на номінальному рівні. Вище останньої позначки спрацьовує команда відключення установки з метою безпеки.

1.5 Висновки до першого розділу

Інформація про середньорічну швидкість вітру слугує вихідною характеристикою для рівня інтенсивності вітру в цілому. Про перспективність

застосування вітрових енергоустановок в тому чи іншому районі можна судити по величині середньорічної швидкості вітру в першому наближенні.

Щоб визначити місце для побудови ВЕС потрібно детально вивчити вітрову мапу місцевості (напрямок та швидкість вітру). Швидкість вітру залежить від висоти, над відкритими ділянками швидкість вітру збільшується, якщо відсутні вітрові провали. На місці побудови ВЕС має бути стійкий та сталий вітер. Науковці роблять замір вітру в районах на протязі декількох років, перед тим ніж обрати ділянку для побудови ВЕС. Вдалим місцем для побудови ВЕС є вершина пагорбу, через гірський перевал, на березі морів і відкритих рівнинах.

Українська вітрова енергетика через війну втратила дві третини своїх попередніх потужностей і зараз переживає не найкращі часи. На відновлення втраченого потенціалу, в кращому випадку можуть піти десятиліття.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИРОБЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ВЕУ

2.1 Аналіз існуючих систем прогнозування генерації вітрових електростанцій

Під час аналізу впливу ВЕУ на енергосистему необхідно враховувати стохастичну природу погодних умов, вироблення електроенергії яких багато в чому залежить від метеорологічних факторів [38, 39].

Прогнозування у сфері вітрової енергетики будується на основі прогнозу потужності вітру. ВЕУ базується на розумінні того, що вітер мінлива в часі величина, яка коливається не лише протягом сезону, а й на хвилинному інтервалі, що зумовлює складність прогнозування значень швидкості вітрового потоку. Тобто можна сказати, що є певний елемент невизначеності. Енергетичні потреби також містять елемент невизначеності. Тому що його достатньо для повного покриття енергетичних потреб важко. З деякою ймовірністю це можна зробити заздалегідь і з урахуванням додаткових електроприймачів електричної енергії практично неможливо, що може змінити графік навантаження потужності [8]. Щоб створити мережу що стосується функціональності, то рекомендується використання Fuzzy Logic (НЛ) [40].

Як правило, існуючі моделі прогнозування можна віднести до однієї з чотирьох категорій: фізичні, статичні інтелектуальні та комбіновані (гібридні) (табл. 2.1) [41].

Всі ці методи володіють одним загальним недоліком – вони є місцевими моделями, тобто модель розробляється під конкретну місцевість і не може бути застосовна до іншій місцевості.

Моделі на основі правил нечіткої логіки, або нечіткі моделі (Fuzzy Models) набули значного розвитку останнім часом завдяки практичним задачам створення і експлуатації різного роду експертних систем в тих

галузях, де неможливо або вкрай складно отримати аналітичними методами оптимальний результат [42].

Таблиця 2.1 – Основні нейронні методи прогнозування вітрових потоків

Методи прогнозування	Приклади	Примітка
Фізичні	Глобальні системи прогнозування; MM5; HIRLAM	Використовують метеорологічні дані, такі як швидкість вітру та його напрям, тиск, температура, вологість, структура території тощо. Точні для довгострокового прогнозування.
Статистичні	Тимчасові ряди	Необхідна велика вибірка вихідних даних. Висока точність для короткострокового прогнозування
Інтелектуальні	Штучні нейронні мережі; Нечіткі системи; вейвлет перетворення	Тренування ШНМ суттєво збільшує точність прогнозу. НМ дозволяє використовувати велика кількість вхідних параметрів. Висока точність для короткострокового прогнозування
Гібридні	ANFIS та ін.	ANFIS показує гарну точність при короткостроковому прогнозування. Є можливість побачити взаємозв'язок між параметрами моделі.

2.2 Обґрунтування застосування нечіткої логіки при проектуванні та експлуатації вітроенергетичних установок

Проектування вітроенергетичних установок та їх експлуатація пов'язані з високою непередбачуваністю можливої швидкості вітру та його напрямки. У зв'язку зі складністю процесів, що протікають в об'єкті, управління ВЕУ має здійснюватися на основі нових математичних моделей, заснованих на теорії нечітких множин і нечіткої логіки.

Традиційно технічна система розглядається як складна, якщо для побудови адекватної моделі не вистачає апріорної інформації. Це означає, що поведінка технічної системи істотно залежить від чинників, вплив яких інформація недостатньо. Тому у випадку, коли об'єктом управління є складна

система, про її модель можна сказати лише те, що невідомі не лише коефіцієнти або параметри аналітичних виразів, що описують об'єкт управління, а й аналітичні співвідношення. Побудова змістовної аналітичної моделі такого об'єкта, управління досить проблематичне і тому необхідно вести мову про інтелектуальну систему.

Швидкість вітрового потоку представляє собою деякий випадковий нестационарний процес. Це призводить до того, що вироблення потужності вітроенергетичної установки, також є деякою величиною з певним ступенем ймовірності, що ускладнює створення енергобалансу у системі. Виникає також завдання розробки оптимального вибору структури електроспоживання для систем з відновлюваними джерелами енергії. У зв'язку з цим виникає завдання досить обґрунтовано описати реальний стан поточкорозподілу в умовах невизначеності джерел генерації, що створює додаткові труднощі при прийнятті рішень, ведення режимів.

Математичні моделі для опису режимів вітроустановок та їх рішення необхідно використовувати методи теорії нечітких множин, які можуть адекватно описати модель зіставлення потужності ВЕУ і потужності споживаної електричної навантаженням. Оскільки потужність вітроустановки визначається кубічною залежністю від швидкості вітру, навіть при невеликих коливаннях швидкості вітру, потужність, що виробляється ВЕУ може коливатися в досить широкому діапазоні потужностей.

Теорія нечітких множин є засобом формалізації нечітких понять і відносин. Вона заснована на деякому узагальненому класичному понятті множини для випадків, коли немає чіткої межі між двома множинами A і B , а елемент a_{it} залишаючи безліч A і переходячи в безліч U зберігає деяку спадну приналежність до множини A . Поряд з цим, приналежність елемента до множини зростає.

Використання нечітких словесних понять, якими оперує особа, яка приймає рішення (вітер "помірний", або навантаження споживача електричної енергії за певний проміжок часу буде "велика") дозволяє ввести в розгляд

якісні описи та врахувати невизначеність завдання, досягти повного опису всіх факторів, що не піддаються точному кількісному опису. Таким чином, даний підхід дозволить отримати модель, яка найбільше прозоро зможе відобразити стан балансу вироблюваної і споживаної потужності за умов невизначеності: непостійності енергоносія та особливості споживача електричної енергії. У процесі ухвалення рішення про ведення режиму, що включає визначення цілей управління, формування завдань, і, нарешті, саме прийняття рішень (вибір альтернатив) така модель зможе досить просто описати багатоекранну постановку задачі [43].

Використання алгоритмів нечіткого регулювання актуально при вирішенні завдань адаптивного управління. Алгоритми нечіткого регулювання вбудовані в систему управління. Загальний принцип роботи нечіткого контролера зводиться до наступного [44]: є список нечітких правил, є входи контролера, на які подаються сигнали, що інтерпретуються пристроєм, як нечіткі.

Застосовуючи алгоритми нечіткого висновку (найчастіше алгоритм Мамдані або Сугено), контролер обробляє вхідну інформацію та видає список дій об'єкту управління.

2.3 Нечітка модель швидкості вітру

Основні параметри вітрового потоку можуть бути представлені у вигляді лінгвістичних змінних, тобто слів чи текстів вербальної моделі. Швидкість вітрового потоку зазвичай є загальновизнаною у світі шкалою Бофорта [45], яка дозволяє дати інтервальну оцінку будь-якої швидкості вітру як лінгвістичних змінних. Можна відзначити, що швидкість вітру може бути представлена різними параметрами, а саме: балами, лінгвістичними змінними з оцінкою інтервалів швидкості вітру, для кожної з них та впливом на вітроустановки. У цьому шкалою Бофорта виділено 12 основних оцінок

швидкості вітру [45–47].

Таблиця 2.2 – Сила вітру за шкалою Бофорта та її вплив на їх роботи

Бали Бофорта	Швидкість вітру, м/с	Характеристики енергії вітру	Вплив вітру на вітрогенератори	Умови експлуатації вітрогенераторів при середній швидкості вітру в діапазоні
2	1,8 – 3,6	Легкий	Відсутній	Погані для всіх установок
3	3,6 – 5,8	Слабкий	Тихохідні вітрогенератори починають обертатися	Задовільно для роботи насосів і деяких аерогенераторів
4	5,8 – 8,5	Помірний	Колеса аерогенеративного рову починають обертатися	Хороші для аерогенератору
5	8,5 – 11	Свіжий	Потужність ВЕУ досягає 30% проектної	Дуже добре
6	11 – 14	Сильний	Максимальна потужність	Дійсний
7	14 – 17	Міцний	Максимальна потужність	Допустимі
8	17 – 21	Дуже міцний	Ряд ВЕУ відключаються	Гранично допустимі
9	21 – 25	Шторм	Усі ВЕУ відключаються	Неприпустимі

Але у дипломній роботі, таблиця 1.1 розглядається 8 основних лінгвістичних оцінок швидкості вітру, починаючи з легкого вітру, через те, що розворот вітротурбін починається саме з цієї швидкості і вище. Штиль і відсутність вітрового потоку, коли швидкість вітру дорівнює нулю не становлять інтересу з енергетичної точки зору. Поряд із цим, такі лінгвістичні оцінки швидкості вітру, як шторм та ураган також неприйнятні, оскільки не передбачені за механічною міцністю та вібраційною стійкістю конструктивним виконанням ВЕУ [34, 48].

При поданні швидкості вітру як деяких інтервальних оцінок, наприклад, від 3,6 до 5,8 м/с вітер, як лінгвістична змінна оцінюється, як «помірний».

Для підвищення достовірності оцінки потужності вітроенергетичних установок скористаємося нечітким уявленням швидкості вітру як деяких

функції приналежності. На цій основі представимо традиційну шкалу Бофорта у вигляді відповідних функцій належності лінгвістичних змінних швидкості вітрового потоку. Для кожної лінгвістичної змінної швидкості вітру, наведеної шкали Бофорта, вибрано трапецеїдальну функцію приналежності.

2.4 Вибір середовища програмування

У наш час існує безліч програм для роботи з нечіткими системами і нейронними мережами, які дозволяють проводити дослідження на них.

У дипломній роботі для прогнозування вироблення потужності ВЕУ було обрано середовище MATLAB внаслідок його простоти у використанні, високої швидкості роботи та наявності значної кількості методичних матеріалів. MATLAB - одним з найпотужніших засобів для побудови нечітких моделей.

Для реалізації процесу нечіткого моделювання в середовищі Matlab використовуємо спеціальний пакет розширення Fuzzy Logic Toolbox.

2.5 Основи нечіткої логіки

На сьогодні актуальним є питання швидкодії обчислювальної техніки в задачах керування режимами напруги. Існує підхід до застосування експертної оцінки або достовірної інформації до керування об'єктами, який реалізується за допомогою нечіткої логіки у структурі керування об'єктом. На цей час, апарат нечіткого логічного керування може підтримуватись системою як програмно, так і апаратно [49].

Нечіткі множини — це математична модель класу з нечіткими (розмитими) межами. В загальному випадку модель демонструє

інформаційно-логічну модель системи, розміщену на новій теорії нечітких множин і нечіткої логіки.

Разом с поняттям нечітких множин Л. Заде [50] має захистити класичну логіку, засновану на основі розгляду нескінченної множини значень істинності. У нечіткій логіці значення істинності висловлювань можуть приймати будь-яке знання істинності з Інтервалу дійсних чисел $[0,1]$. Це дозволяє створити логічну систему, в якій можна створити нову систему висловлювань істинності. Важливим поняттям нечіткої логіки є поняття елементарного нечіткого висловлювання. Це декларативне речення, що виражає закінчену думку, про істинність чи хибність якої ми можемо судити лише з певним ступенем впевненості.

Неясність або нечіткість межі системи у вітроенергетиці: Характеристики енергії вітру : «Легкий», « Слабкий», « Помірний» «Дуже міцний», «Шторм». Умови експлуатації вітрогенераторів: «Погані для всіх установок», «Дуже добре», Допустимі», «Гранично допустимі», «Неприпустимі»

Однією з головних переваг нечіткої логіки є її здатність справлятися з невизначеністю та неточністю даних. Традиційні системи ШІ покладаються на двійкову логіку, яка вимагає, щоб дані були або істинними, або хибними. Це може бути проблематично під час роботи з даними реального світу, які часто є неповними, шумними або неоднозначними. З іншого боку, нечітка логіка забезпечує певний ступінь істинності, дозволяючи системам штучного інтелекту приймати більш точні та надійні рішення на основі неповної або невизначеної інформації.

Ще однією перевагою нечіткої логіки є її гнучкість і адаптивність. Системи нечіткої логіки можна легко модифікувати та налаштовувати відповідно до конкретних програм, що робить їх привабливими варіантами для широкого кола галузей [50].

Однією з головних проблем є розробка ефективних алгоритмів для навчання та міркування за допомогою нечіткої логіки. [51].

2.6 Класифікація функцій приналежності

Найбільш характерним прикладом функцій приналежності є "трикутна" (рис. 2.1 а), "трапецієвидна" (рис. 2.1 б)

Трапецієвидна функція приналежності f_T характеризується чотирма параметрами і в загальному випадку з використанням виразу (2.1) може бути записана у вигляді $f_T(x; a, b, c, d)$. При цьому параметри ТНІ $\tilde{A}_T = \langle a, b, \alpha, \beta \rangle_T$ однозначним чином пов'язані з параметрами трапецієвидної функції приналежності $f_T(x; a, b, c, d)$. А саме, нижнє модальне значення ТНІ тотожно дорівнює параметру b функції приналежності $f_T(x; a, b, c, d)$, верхнє модальне значення ТНІ тотожно рівне параметру c функції приналежності $f_T(x; a, b, c, d)$, тобто $b=c$, а лівий і правий коефіцієнти нечіткості ТНЧ відповідно дорівнюють: $\alpha=b-a$, $\beta=d-c$.

Приклад конкретного ТНІ $\langle 4, 6, 2, 1 \rangle_T$, яке відповідає "нечіткому інтервалу від 4 до 6", зображений на рис. 2.1. б.

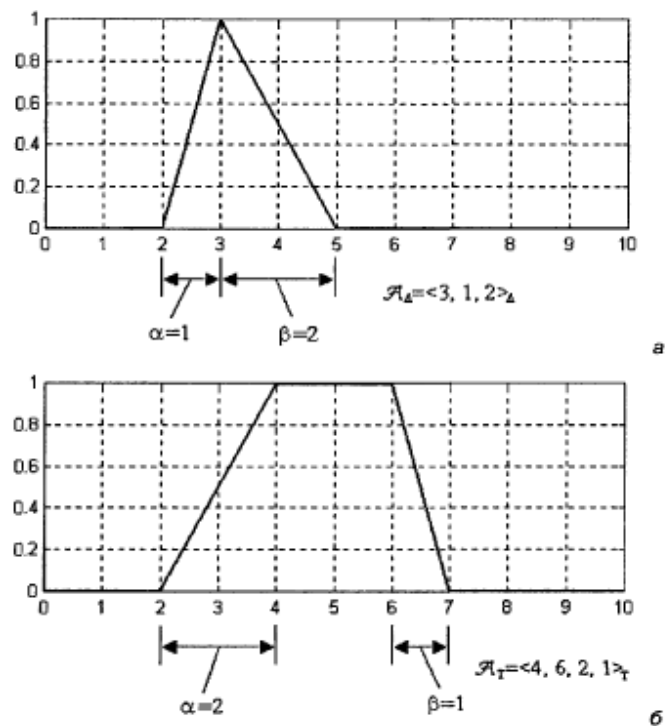


Рисунок 2.1 – Графічне представлення ТНЧ $A_A = \langle 3, 2, 1 \rangle_A$, (а) і ТНІ $A_T = \langle 4, 6, 2, 1 \rangle_T$ (б)

"Трикутна" функцій приналежності в загальному випадку може бути задана аналітично наступним виразом (2.1) [49, 52]:

$$f_{\Delta}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}, \quad (2.1)$$

де a, b, c – деякі числові параметри, що приймають довільні дійсні значення і впорядковані відношенням: $a \leq b \leq c$.

Трапецієвидна функція приналежності в загальному випадку може бути задана аналітично наступним виразом (2.2) [45, 48]:

$$f_T(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}, \quad (2.2)$$

де a, b, c, d – деякі числові параметри, що приймають довільні дійсні значення і впорядковані відношенням: $a \leq b \leq c \leq d$.

Параметри a і d характеризують нижню основу трапеції, а параметри b і c – верхню основу трапеції.

При побудові функцій приналежності для нечітких множин слід дотримуватися деяких правил, які зумовлюються характером невизначеності, що має місце при побудові конкретних нечітких моделей.

Даний нечіткий предикат може приймати не одне з двох значень істинності ("істина" або "хиба"), а цілий континуум значень істинності, які для зручності вибираються з інтервалу $[0,1]$. При цьому значенню "істина" як і раніше відповідає число 1, а значенню "хиба" – число 0.

Змістовно це означає наступне. Чим більшою мірою елемент $x \in X$ володіє даною властивістю, тим більш близьке до 1 повинне бути значення істинності відповідного нечіткого предиката. І навпаки, ніж у меншій мірі

елемент $x \in X$ володіє даною властивістю, тим більш близьке до 0 повинне бути значення істинності цього нечіткого предиката. Якщо елемент $x \in X$ безумовно не володіє даною властивістю, то відповідний нечіткий предикат приймає значення "хиба" (або число 0). Якщо ж елемент $x \in X$ безумовно володіє даною властивістю, то відповідний нечіткий предикат приймає значення "істина" (або число 1) [53].

Процес побудови або завдання нечіткої множини на основі деякого відомого заздалегідь кількісного значення вимірної ознаки отримав навіть спеціальну назву – *фазифікація* або приведення до нечіткості.

Формалізація суб'єктивної оцінки швидкості може бути виконана за допомогою наступної лінгвістичної змінної $\langle \beta_1, T, X, G, M \rangle$, де

β_1 – швидкість;

$T = \{ \text{"мала швидкість"}, \text{"середня швидкість"}, \text{"висока швидкість"} \};$

$X = [0,100];$

G – процедура утворення нових термів за допомогою логічних зв'язок "І", "АБО" і модифікаторів типу "дуже", "НЕ", "злегка" і ін. Наприклад: "мала або середня швидкість", "дуже висока швидкість" і ін.;

M – процедура завдання на $X = [0,100]$ нечітких змінних $\alpha_1 = \text{"мала швидкість"}$, $\alpha_2 = \text{"середня швидкість"}$, $\alpha_3 = \text{"висока швидкість"}$, а також відповідних нечітких множин для термів з $G(T)$ відповідно до правил трансляції нечітких зв'язок і модифікаторів "І", "АБО", "НЕ", "дуже", "злегка".

2.7 Короткі теоретичні відомості Fuzzy Logic Toolbox математичного пакета MatLab

Fuzzy Logic Toolbox – пакет додатків, що входять до середовища MatLab [52]. Це дозволяє створювати системи нечіткого висновку та нечіткої класифікації в середовищі MatLab та інтегрувати їх із Simulink.

Основні властивості:

- визначення змінних, нечітких правил і функцій належності;
- сучасні методи: адаптивний нечіткий логічний висновок з використанням нейронних мереж, нечітка кластеризація;
- інтерактивне динамічне моделювання в Simulink;
- генерація портативного C коду за допомогою Real-Time Workshop.

Пакет *Fuzzy Logic* містить сучасні методи нечіткого моделювання, в тому числі:

- адаптивний нечіткий логічний висновок з використанням нейронних мереж для автоматичного формування функції належності при її навчанні на вхідних даних;
- нечітка логіка та кластеризація для задач розпізнавання образів;
- можливість вибору відомого методу Мамдані або методу Сугено для створення гібридних нечітких систем.

Пакет дозволяє:

- в режимі графічного інтерфейсу;
- в режимі командного рядка;
- використання блоків і прикладів з пакету Simulink.

Пакет інструментів *Fuzzy Logic* містить такі категорії програмних засобів:

Функції; інтерактивні модулі з графічним інтерфейсом (з GUI);

Блоки для пакету Simulink;

Для проектування системи нечіткого висновку необхідно вибрати лінгвістичні змінні і задати множини їх значень. Кількість функцій приналежності визначається множиною значень лінгвістичної змінної, тобто в завданні, що розглядається, для кожної лінгвістичної змінної необхідно задати функцій приналежності. Тип і параметри функцій приналежності, а також діапазон можливих значень лінгвістичних змінних попередньо визначити неможливо, тому вони вибираються орієнтовно на основі дослідника і наявної

інформації про об'єкт управління, а потім уточнюються шляхом багатократного моделювання.

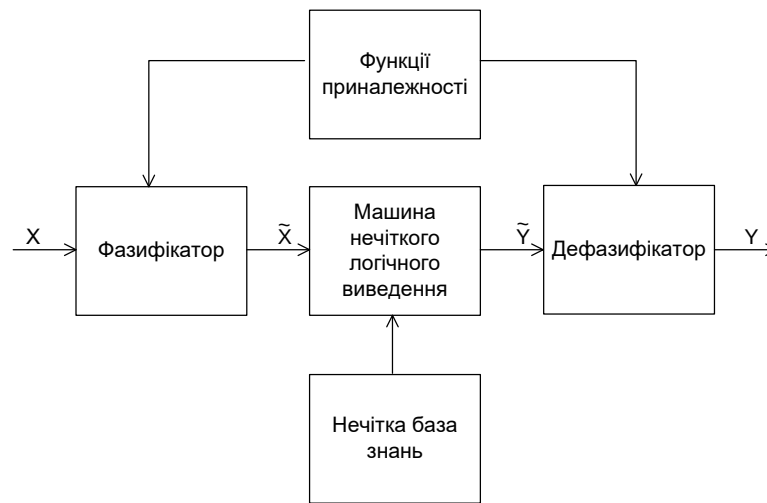


Рисунок 2.2 – Нечітке логічне виведення

Позначення: X – вхідний чіткий вектор; $\tilde{X}$ – вектор нечітких множин, що відповідає вхідному вектору X ; $\tilde{Y}$ – результат логічного виведення у вигляді вектора нечітких множин; Y – вихідний чіткий вектор.

Алгоритм нечіткого висновку Mamdani :

Для нечіткого виведення використовуємо алгоритм Мамдані. У системах типу Мамдані значення вихідної змінної задаються нечіткими термами. База знань складається з правил виду “Якщо x_1 =низький та x_2 =середній, то y =високий” [52].

Розглянемо основні етапи проєктування систем типу Mamdani:

Цей алгоритм дає змогу отримати адекватні рішення за меншої кількості правил, ніж за інших способів створення бази правил. Математичний алгоритм Мамдані складається з наступних послідовних кроків:

Зведення до нечіткості (фазифікація): визначається ступінь істинності для передумов кожного правила.

Нечіткий висновок: визначається на рівні «відсікання» для передумов кожного з правил, далі знаходять відсічені функції належності.

Композиція: виконується об'єднання знайдених відсічених функцій для отримання результуючої нечіткої множини для змінної виходу з функцією належності [54].

Зведення до чіткості (дефазифікація).

Принцип роботи алгоритму у вітроенергетиці

Принцип дії алгоритму полягає у збільшенні або зменшенні швидкості ротора відповідно до збільшення або зменшення розрахункової вихідної потужності. Якщо зміна потужності позитивна, пошук продовжується в тому ж напрямку при останній позитивній зміні швидкості ротора. Коли позитивна зміна призводить до негативної зміни, напрямок пошуку змінюється. Під час цих поступових змін швидкості ротора контролер відстежує зміни вихідної потужності вітрової турбіни та підтримує постійну швидкість ротора, при якій ці зміни вихідної потужності дорівнюють нулю. Якщо вихідне значення сильно відхиляється від вхідного значення, контролер встановлює більше значення кроку, щоб швидше досягти максимальної продуктивності. Якщо швидкість потоку генератора близька до вихідної, контролер також повинен встановити менше значення кроку, щоб уникнути згинання колін і забезпечити стабільність системи.

2.8 Висновки до другого розділу

Теорія нечітких множин і нечітка логіка є основою багатьох методів моделювання систем і методів дослідження в галузі штучного інтелекту. Для реалізації процесу нечіткого моделювання за допомогою програми Matlab в неї інтегровано спеціальний пакет розширення Fuzzy Logic Toolbox. Цей пакет виконує дії, пов'язані з використанням нечітких моделей та їх розробкою.

РОЗДІЛ 3 РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИРОБЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ВЕУ

3.1 Формалізація вхідних даних

Модель ВЕУ була реалізована у програмі MATLAB з використанням елементів бібліотеки Simulink. Головні характеристики для розрахунку потужності ВЕУ наведені у табл.3.1 і 3.2. Модель має три вхідних параметри: 1) швидкість вітру; 2) вид місцевості; 3) умови експлуатації вітрової установки і одну вихідну – потенціал енергії.

Для розрахунків використовуємо:

- 1) Таблиця 2.2 – Сила вітру за шкалою Бофорта та її вплив на їх роботи, стор. 42;
- 2) Таблиця 1.1 – Середньорічні швидкості вітру v , м/с, і питомі валові потенціали вітрової енергії, кВт·год/(м²·рік), стор. 22;
- 3) Таблиця 1.2 – Класифікація вітрового потенціалу місцевостей за особливостями нерівностей, стор. 24

3.2 Реалізація алгоритму для прогнозування

Розробку нечіткої моделі оцінювання потужності вітрової турбіни виконуємо в MATLAB відповідно до рекомендацій [52].

Лінгвістичними змінними є: 1) Швидкість вітру задаємо 8 функцій приналежності; 2) вид місцевості – задаємо 5 функцій приналежності; 3) умови експлуатації вітрової установки – задаємо 8 функцій приналежності. На виході – потенціал енергії задамо 9 змінних.

Тип і параметри функцій приналежності, а також діапазон можливих значень лінгвістичних змінних попередньо визначити неможливо, тому вони

вибираються орієнтовно на основі наявної інформації про об'єкт управління, а потім уточнюються шляхом багатократного моделювання.

Для завдання і редагування функцій приналежності використовуємо програму редактора функцій приналежності (ФП).

Будуємо систему нечіткого висновку, використовуючи FIS редактор. Вид вікна редактора показано на рисунку. 3.1.

Відкриваємо MatLab в командному вікні (Command window) пишемо fuzzy і відкривається стартове вікно:

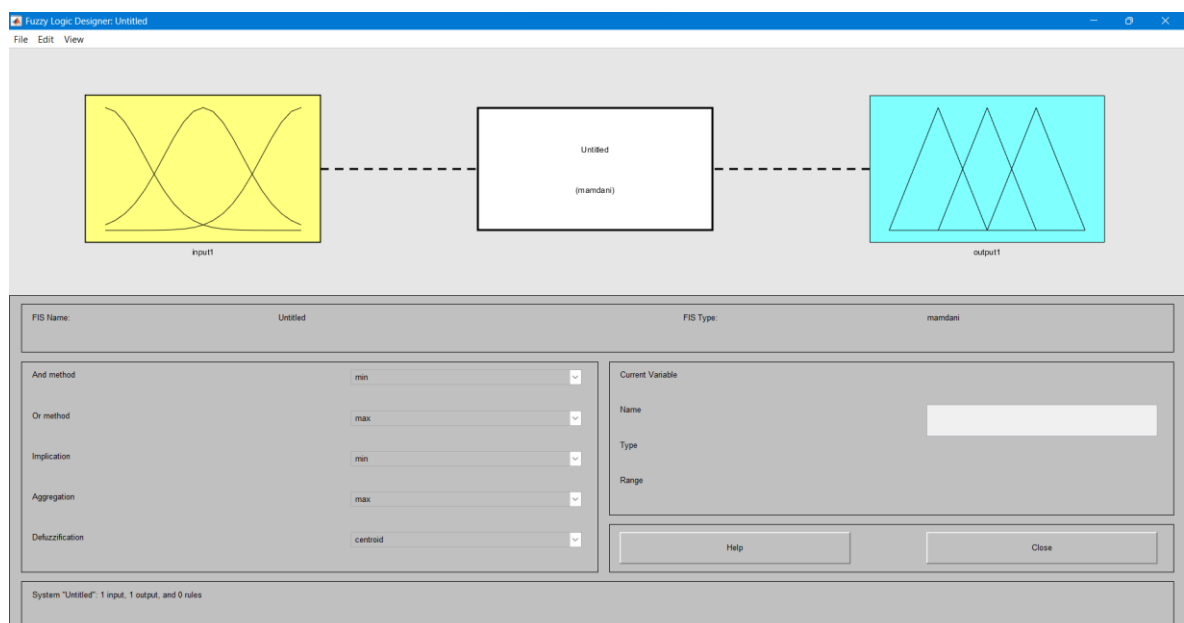


Рисунок 3.1 – Початкове вікно fuzzy

Додаємо ще два блоки за допомогою меню Edit >> Add Variable ...>> Input, та отримуємо три блоки:

Натискаємо на блок input1 в розділі Name задаємо йому ім'я Wind_Speed («Швидкість вітру»), те ж робимо з наступними блоками, input2 замінюємо на Place («вид місцевості»), input3 на Conditions («Умови експлуатації»), та output1 замінюємо на Energy («умови експлуатації вітрової установки») (рисунок 3.1)

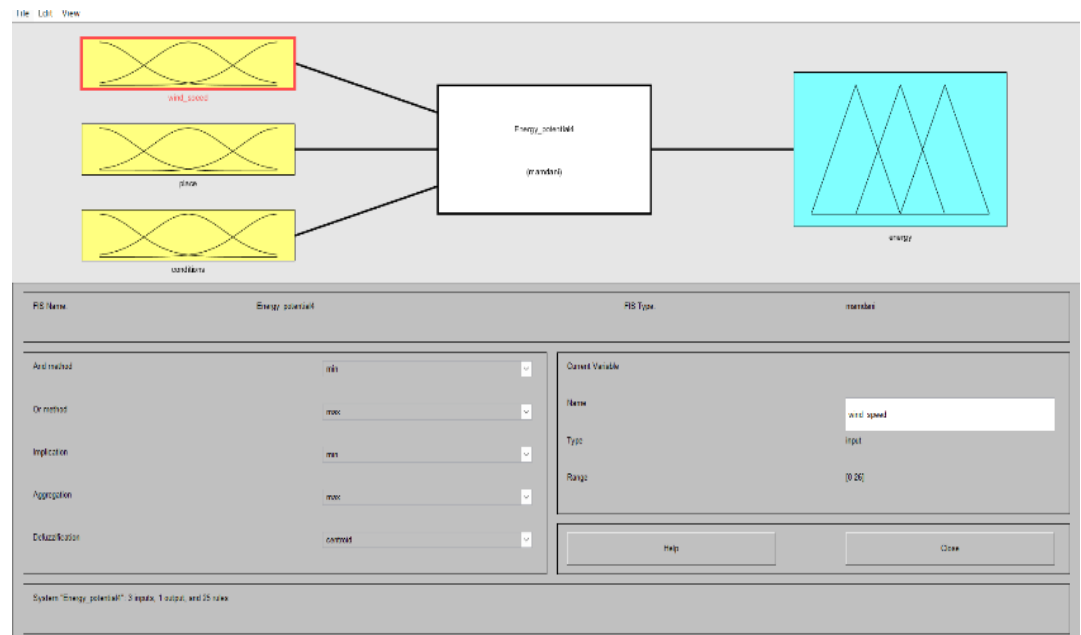


Рисунок 3. 2 – Структура системи нечіткого висновку

Після того як кожен блок названий переходимо в меню Edit >> Membership Functions , або двічі натискаємо мишкою на блоці Wind_Speed.

Перед нами відкриється графічний редактор Membership Function Editor (рис.3.3), де ми будемо задавати параметри кожному блоку.

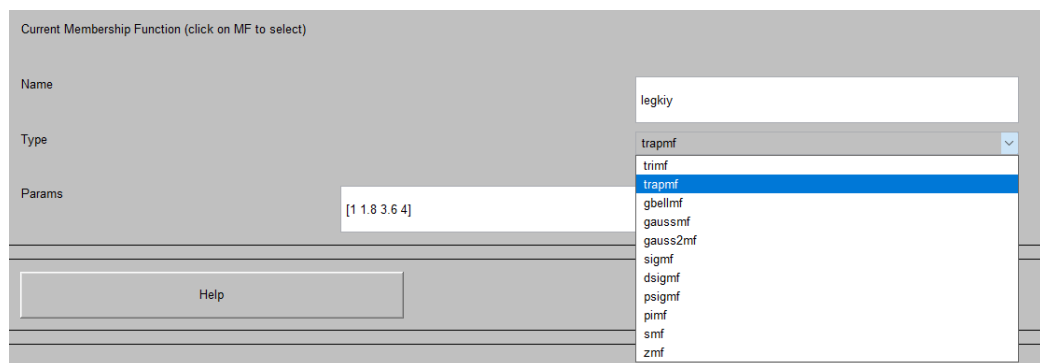


Рисунок 3.3 – Діалогове вікно Membership Function

Обираємо блок Wind_Speed. Для вказаної лінгвістичної змінної задаємо вісім трапецеїдальних функцій приналежності типу (trapmf). Для цього необхідно перейти в меню Edit >> Add MFs, після чого відкриється діалогове вікно де задається функція приналежності та число цих функцій тут ми змінюємо параметри як показано на рис 3.2.

Тепер повернувшись до графічного редактора Membership Function Editor (рис.3.3), натискаємо на трапеції, що знаходяться на графіку блоку Wind_Speed. та задаємо їм ім'я, значення параметрів та діапазон: Range – [0 26].

Діапазон їх зміни встановлено на основі даних таблиці 3.2 від 0 до 26. Оцінками для функції приналежності є швидкість вітру м / с по шкалі Бофорта. Терми: характеристика енергії вітру. Отримуємо таблицю 3.1 і графік блоку рис 3.3.

1. Вхідна лінгвістична змінна «Швидкість вітру».

Представимо шкалу Бофорта (табл.3. 1) характерними функціями власності лінгвістичних змінних вітру [40]. При розгляді функції приналежності швидкості вітру необхідно враховувати приналежність в інтервалі від 0 до 1. Для прикордонних інтервальних значень швидкості вітру кожної характеристики $\mu=0\dots 1$. Значення швидкості кожному діапазоні дорівнюватиме $v_{\min} - \mu$;

$v_{\max} + \mu$ (де кожен переріз характеризуватиме рівень приналежності α_j (де $j=0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$

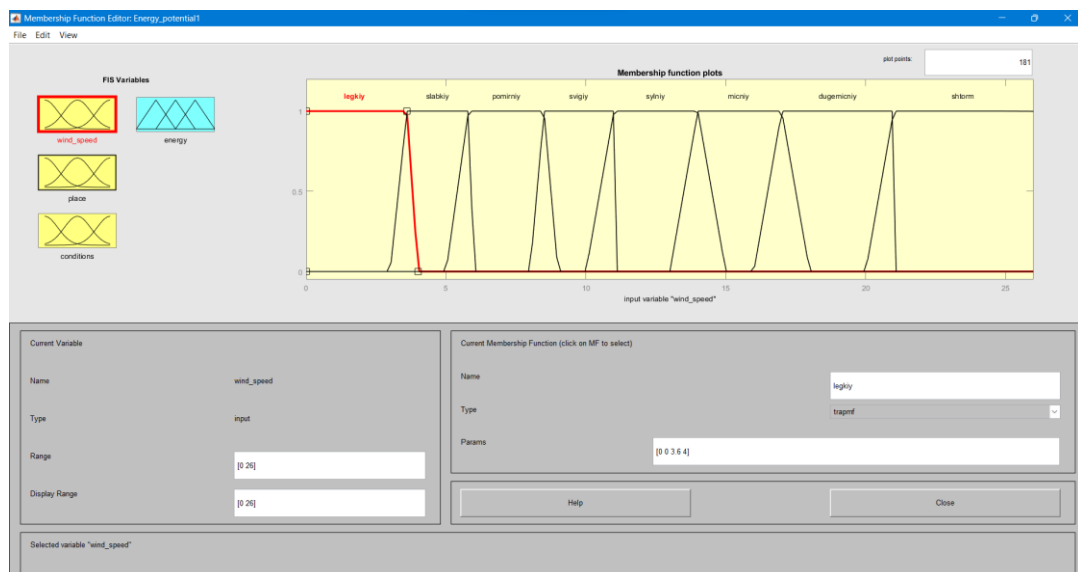


Рисунок 3.4 Графік вхідної лінгвістичної змінної блоку Wind Speed («Швидкість вітру») з назвами трапецій

Таблиця 3.4 – Вхідна лінгвістична змінна «Швидкість вітру»

1 Вхідна лінгвістична змінна «Швидкість вітру»			
	Оцінки для функції приналежності	Терми	Функції приналежності (трапецеїдальні)
Бали Бофорта	Швидкість вітру, м/с	Характеристики енергії вітру	
2	1,8 – 3,6	Легкий	[1 1.8 3.6 4]
3	3,6 – 5,8	Слабкий	[3 3.6 5.8 6]
4	5,8 – 8,5	Помірний	[5 5.8 8.5 9]
5	8,5 – 11	Свіжий	[8 8.5 11 11]
6	11 – 14	Сильний	[10 11 14 14]
7	14 – 17	Міцний	[13 14 17 17]
8	17 – 21	Дуже міцний	[16 17 21 21]
9	21 – 25	Шторм	[20.5 21 25 1000]

2. Для другої лінгвістичної змінної «Вид місцевості» вибрано 5 трикутних функцій приналежності. Діапазон їх зміни встановлено Range – [0 10] . Оцінками для функції приналежності є ступінь відкритості (закрита, відкрита, морський берег тощо) див. таблицю 1.1 (розділ 1) Середньорічні швидкості вітру v , м/с, і питомі валові потенціали вітрової енергії, кВт·год/(м²·рік) згідно з типами рельєфу. Буде оцінюватись по десятибальній шкалі відповідно таблиці 1.3 Класифікація вітрового потенціалу місцевостей за особливостями нерівностей.

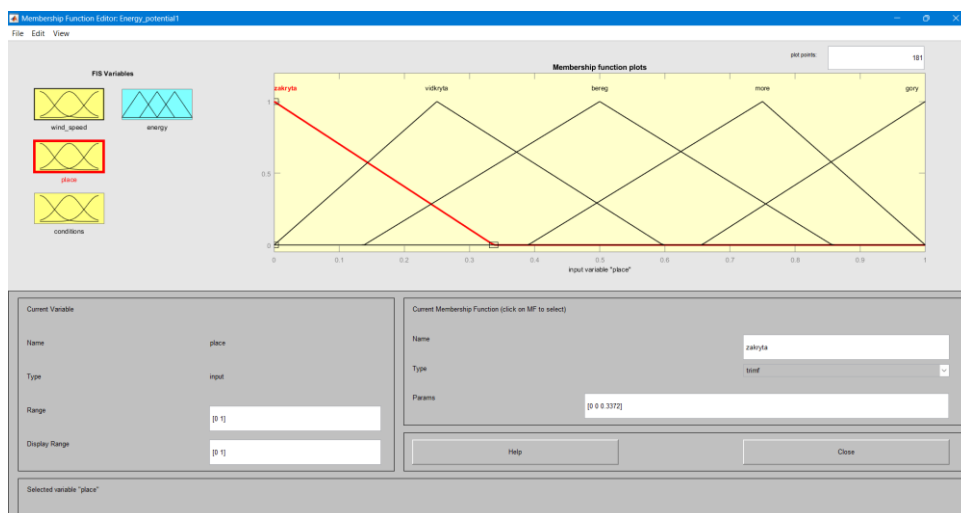


Рисунок 3.5 – Графік вхідної лінгвістичної змінної блоку «Вид місцевості» (Place)

Таблиця 3.5 – Вхідна лінгвістична змінна «Вид місцевості» (ступінь відкритості)

Терми	Функції приналежності (трикутні)
Закрита (забудована)	[0 0 0.25]
Відкрита	[0 0.25 0.5]
Морський берег	[0.25 0.5 0.75]
Відкрите море	[0.5 0.75 1]
Гори та пагорби	[0.75 1 1]

3. Переходимо в блок (Conditions) (таблиця 3.5 і рис 3.5)

Будуємо 8 трикутних функцій приналежності згідно термів. Діапазон їх зміни встановлено від 0 до 1 рівномірно.

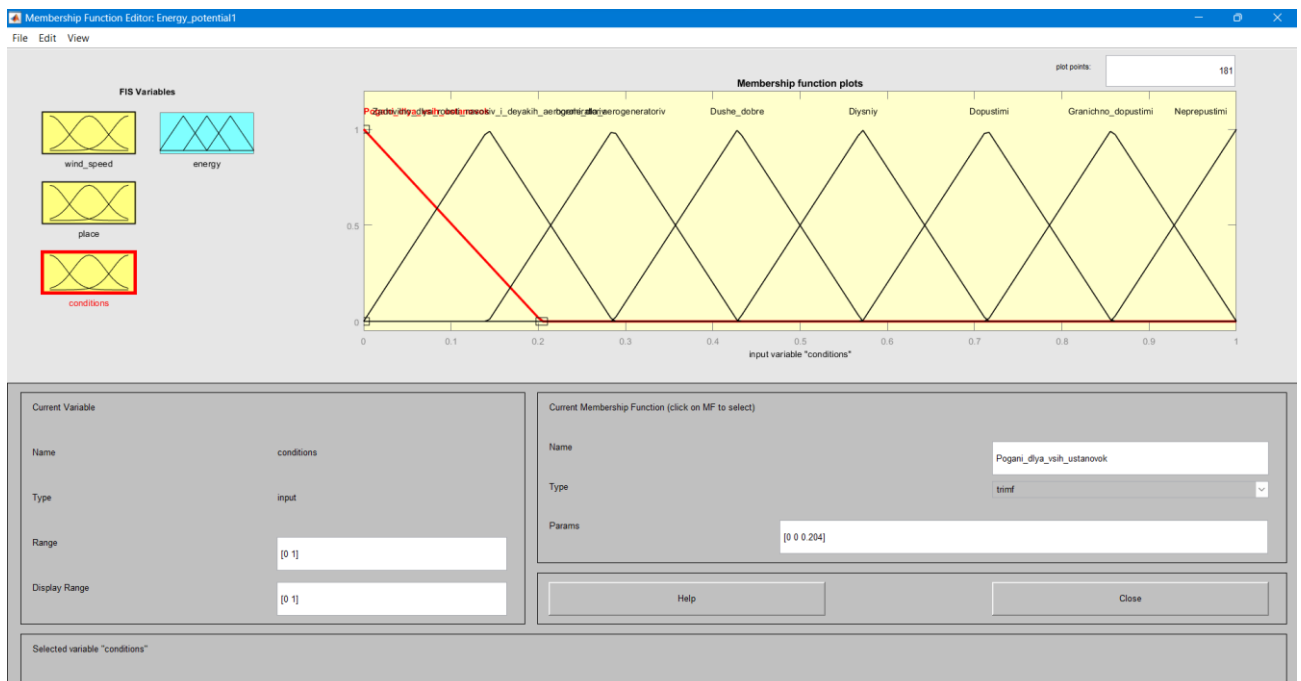


Рисунок 3.6 – Графік вхідної лінгвістичної змінної умови експлуатації «condition»

Таблиця 3.6 – Вхідна лінгвістична змінна «Умови експлуатації»

Терми	Функція приналежності трикутна
Погані для всіх установок	[-0.1429 -4.337e-18 0.1429]
Задовільно для роботи насосів і деяких аерогенераторів	[0 0.1429 0.2857]
Хороші для аерогенератору	[0.1429 0.2857 0.4286]
Дуже добре	[0.2857 0.4286 0.5714]

Продовження таблиці 3.6

Терми	Функція приналежності трикутна
Дійсний	[0.4286 0.5714 0.7143]
Допустимі	[0.5714 0.7143 0.8571]
Гранично допустимі	[0.7143 0.8571 1]
Неприпустимі	[0.8571 1 1.1]

4. Вихідна змінна - Питомі валові потенціали вітрової енергії $\text{кВт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{рік})$.

Для вихідної змінної «Питомі валові потенціали вітрової енергії», або Energy, будуюмо 9 функцій приналежності типу `trapmf` (трапецієподібні) згідно термів. Діапазон їх зміни встановлено від 0 до 4000. Оцінки для функції приналежності будуються на основі таблиці 3.1, де за опорний параметр для формування термів береться швидкість вітру, м/с.

Для цього дані про питомі валові потенціали вітрової енергії групуються за швидкістю вітру в 9 термів, як показано в таблиці 3.7

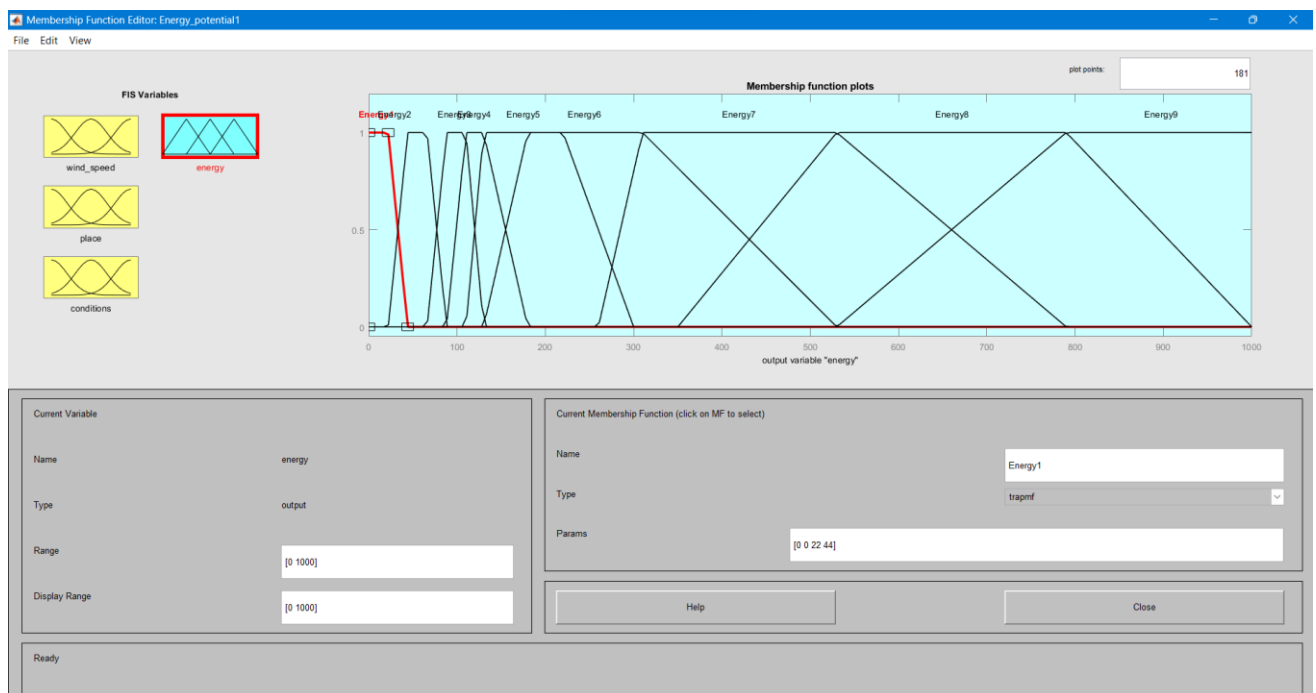


Рисунок 3.7 – Вихідна лінгвістична змінна Energy

Виходячи з того, що система нечіткого висновку має три вхідні лінгвістичні змінні, для кожної з яких встановлено: для першої лінгвістичної змінної – 8 значень; для другої лінгвістичної змінної – 5 значень; для третьої лінгвістичної змінної – 8 значень; і для вихідної 9 значень. База правил нечіткого висновку має 58 правил. Правила формуються по таблиці 3.4 – 3.7

Таблиця 3.8 – Правила нечіткого висновку

Сила вітру		Місцевість	Умови експлуатації	Питомі валові потенціали вітрової енергії	
>6,0	Помірний	Закрита	Хороші	>110	Energy5
5-6<0	Слабкий	Закрита	Задовільні	66-110	Energy3
4,4-5,0	Слабкий	Закрита	Задовільні	44 – 66	Energy2
3,5-4,5	Слабкий	Закрита	Задовільні	22-44	Energy1
<3,5	Легкий	Закрита	Погані	<22	Energy1
>7,5	Помірний	Відкрита	Хорош	>220	Energy6
6,5-7,5	Помірний	Відкрита	Хороші	130-220	Energy5
5,5-6,5	Помірний	Відкрита	Хороші	88-130	Energy3
4,5-5,5	Слабкий	Відкрита	Задовільно	44-88	Energy2
4,5	Слабкий	Відкрита	Задовільно	<44	Energy1
>8,5	Помірний	Морський берег	Хорош	>310	Energy7
7,0-8,5	Помірний	Морський берег	Хороші	180-310	Energy6
6,0-7,0	Помірний	Морський берег	Хороші	110-180	Energy5
5,0-6,0	Слабкий	Морський берег	Хороші	66-110	Energy3
<5,0		Морський берег	Задовільно	<66	Energy2
>9,0	Свіжий	Відкрите море	Дуже добре	>350	Energy8
8,0-9,9	Свіжий	Відкрите море	Дуже добре	260-350	Energy7
7,8-8,0	Помірний	Відкрите море	Хороші	180-260	Energy6
5,5-7,0	Помірний	Відкрите море	Хороші	88-180	Energy4

Продовження таблиці 3.8

Сила вітру		Місцевість	Умови експлуатації	Питомі валові потенціали вітрової енергії	
<5,5	Слабкий	Відкрите море	Задовільно	<88	Energy2
>11,5	Сильний	Пагорби і гори	Дуже добре	>790	Energy9
10-11,5	Свіжий	Пагорби і гори	Дуже добре	530-790	Energy8
8,5-10	Свіжий	Пагорби і гори	Дуже добре	310-530	Energy7
7,0-8,5	Помірний	Пагорби і гори	Хороші	180-310	Energy6
<7,0	Слабкий	Пагорби і гори	Хороші	<180	Energy4
>6,0	Помірний	Закрита	none	>110	Energy5
5-6<0	Слабкий	Закрита	none	66-110	Energy3
4,4-5,0	Слабкий	Закрита	none	44 – 66	Energy2
3,5-4,5	Слабкий	Закрита	none	22-44	Energy1
<3,5	Легкий	Закрита	none	<22	Energy1
>7,5	Помірний	Відкрита	none	>220	Energy6
6,5-7,5	Помірний	Відкрита	none	130-220	Energy5
5,5-6,5	Помірний	Відкрита	none	88-130	Energy3
4,5-5,5	Слабкий	Відкрита	none	44-88	Energy2
4,5	Слабкий	Відкрита	none	<44	Energy1
>8,5	Помірний	Морський берег	none	>310	Energy7
7,0-8,5	Помірний	Морський берег	none	180-310	Energy6
6,0-7,0	Помірний	Морський берег	none	110-180	Energy5
5,0-6,0	Слабкий	Морський берег	none	66-110	Energy3
<5,0		Морський берег	none	<66	Energy2
>9,0	Свіжий	Відкрите море	none	>350	Energy8
8,0-9,9	Свіжий	Відкрите море	none	260-350	Energy7
7,8-8,0	Помірний	Відкрите м	none	180-260	Energy6

Продовження таблиці 3.8

Сила вітру		Місцевість	Умови експлуатації	Питомі валові потенціали вітрової енергії	
5,5-7,0	Помірний	Відкрите море	none	88-180	Energy4
<5,5	Слабкий	Відкрите море	none	<88	Energy2
>11,5	Сильний	Пагорби і гори	none	>790	Energy9
10-11,5	Свіжий	Пагорби і гори	none	530-790	Energy8
8,5-10	Свіжий	Пагорби і гори	none	310-530	Energy7
7,0-8,5	Помірний	Пагорби і гори	none	180-310	Energy6
<7,0	Слабкий	Пагорби і гори	none	<180	Energy4
1,8 – 3,6	Легкий	None	погані	0	Energy2
3,6 – 5,8	Слабкий	None	задовільні		Energy5
5,8 – 8,5	Помірний	None	хороші		Energy6
8,5 – 11	Свіжий	None	Дуже добре	30%	Energy7
11 – 14	Сильний	None	Дійсний	Номінал	Energy8
14 – 17	Міцний	None	Допустимі	максимум	Energy9
17 – 21	Дуже міцний	None	Гранично допустимі		Energy3
21 – 25	Шторм	None	неприпусти мі	0	Energy1
21 – 25	Шторм	None	None		Energy1
	Легкий	None	None		Energy1

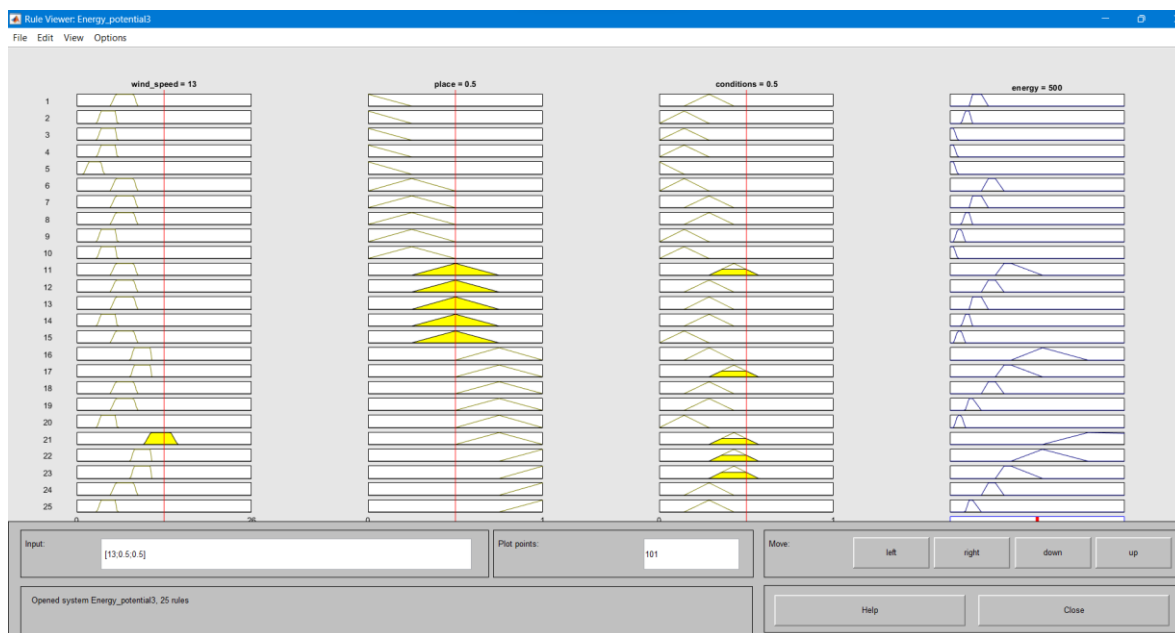


Рисунок 3.9 – Результат оцінювання системою при певних значеннях змінних.

Для відображення залежності вихідного значення змінної від вхідних перейдемо View >> Surface де можна отримати поверхню відгуку при відповідному виборі пункт-меню (рис.3.9.).

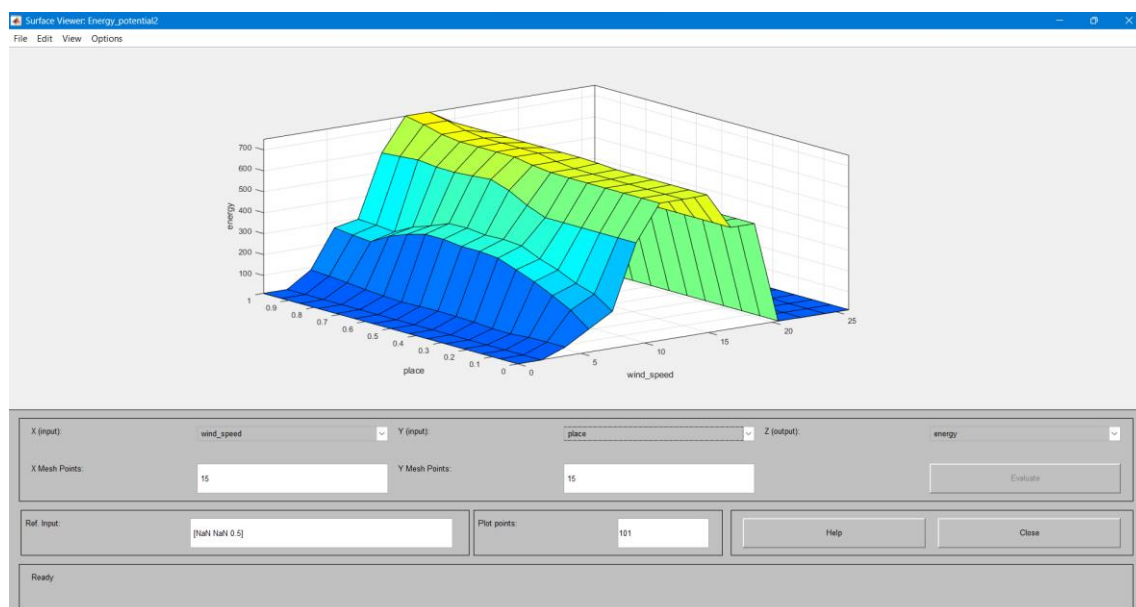


Рисунок 3.10 – Вікно перегляду поверхні відгуку

Збереження системи File >> Export >> To File.

Для перегляду правил View >> Rules (вікно перегляду правил) і

ПОДИВИМОСЬ НА ЗНАЧЕННЯ ЗМІННИХ, (рис. 3.11 - .3.13.)

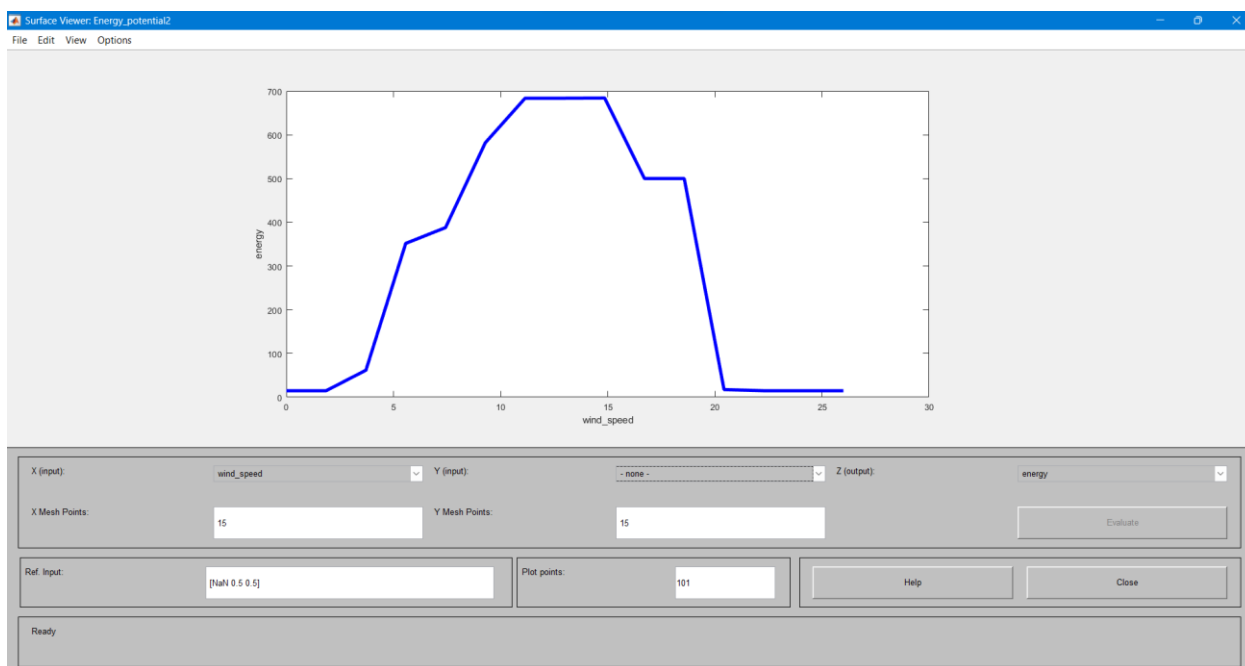


Рисунок 3.11 – Вікно перегляду графіка швидкості вітру

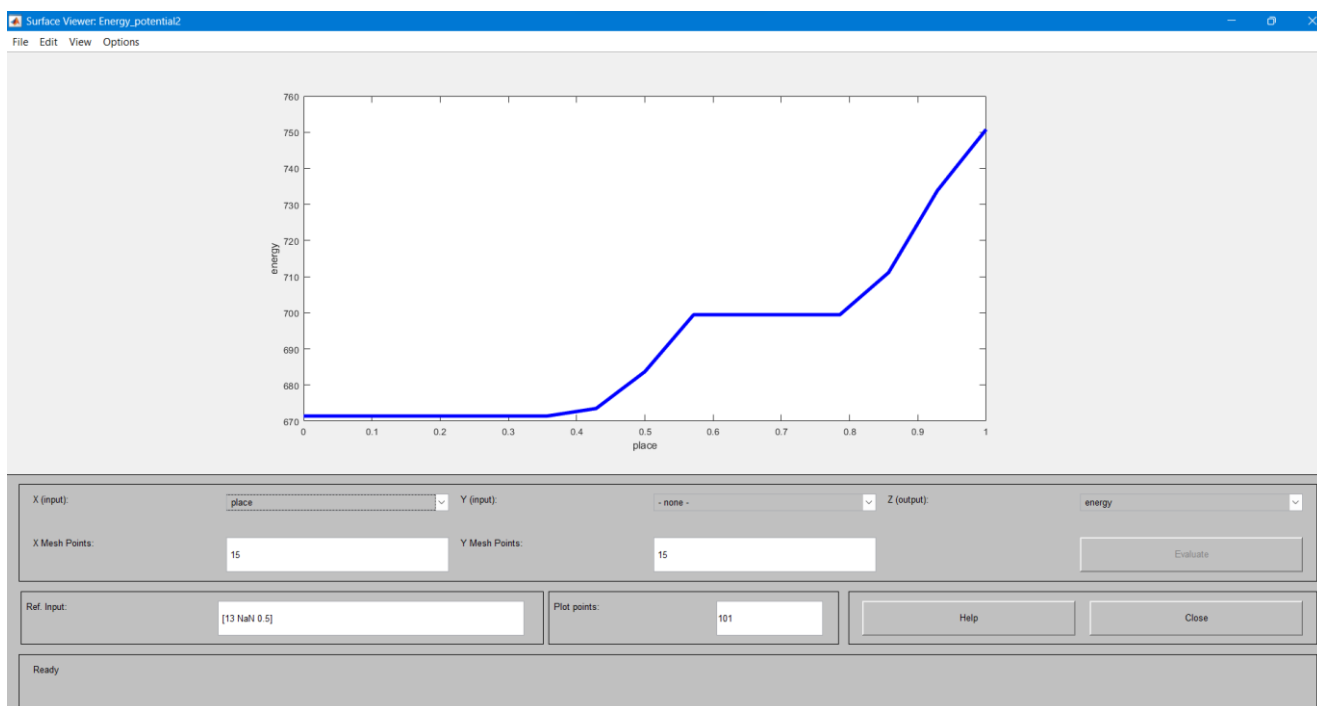


Рисунок 3.12 – Вікно перегляду графіка місцевості

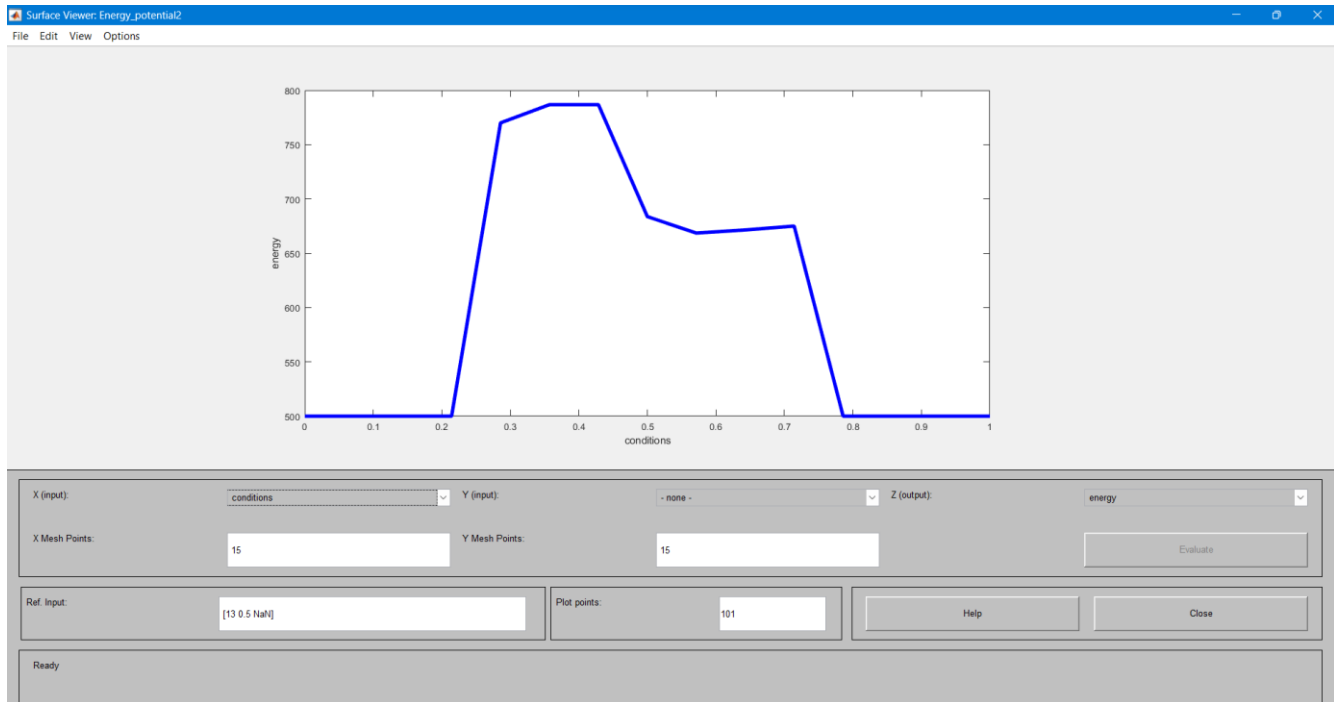


Рисунок 3.13 – Вікно перегляду графіка умов експлуатації

3.3 Висновки до третього розділу

В графічному режимі основної програми пакету Fuzzy Logic Toolbox – FIS – редакторі сформовано структуру системи нечіткого висновку, вибрані лінгвістичні змінні і задані множини їх значень, визначені діапазон зміни, тип і параметри функцій приналежності лінгвістичних змінних, вибрано алгоритм нечіткого висновку, сформовано базу правил нечіткого висновку.

ВИСНОВКИ

Під час виконання даної магістерської роботи були описані та вирішені всі поставлені задачі по прогнозуванню потужності вітрової турбіни. Всі розрахунки, приведені у роботі є приблизними через недостатність інформації. При вивченні теоретичних основ нечіткої логіки основною метою даного завдання було глибше проникнути в сутність нечіткої логіки, щоб уможливити подальший розвиток цього проекту. Правильне розуміння теорії завжди є запорукою успіху будь-якого проекту.

В результаті виконання цього завдання було отримано знання та розуміння того, як виконати наступне завдання – проектування моделі нечіткої системи керування.

Метою розробки моделі нечіткої системи керування було створення чіткої структури та механізму нечіткого керування. Проте досягнення мети цього завдання було неможливим без виконання такої підзадачі, як визначення та дослідження алгоритму роботи системи нечіткого керування. Після вивчення даного алгоритму та визначення всіх його складових вдалося спроектувати структуру нечіткої системи керування, що дало можливість приступити до наступного завдання – розробки нечіткої системи керування.

Етап розробки є основною частиною цієї роботи, і за допомогою правильно виконаних попередніх завдань вдалося розробити систему, яка дозволяє досягти нашої головної мети - набути здатності створювати та обробляти програми нечіткого керування незалежно від їх предметна область. Основною складовою успіху проблеми нечіткого керування є її правильне формулювання, що означає, що основним ресурсом для задач нечіткого керування є експертні знання, знання, які людина може призначити системі за допомогою природної мови.

В результаті роботи було проведено аналіз існуючих методів прогнозування вітроенергетичних установок. В середовищі

MATLAB/Simulink в графічному режимі основної програми пакету Fuzzy Logic Toolbox – FIS – редакторі сформовано структуру системи нечіткого висновку, вибрані лінгвістичні змінні і задані множини їх значень, визначені діапазон зміни, тип і параметри функцій приналежності лінгвістичних змінних, вибрано алгоритм нечіткого висновку, сформовано базу правил нечіткого висновку.

Була розроблена модель, яка дає можливість застосовувати цей алгоритм під всі види місцевостей.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вітроенергетика [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://alternative-energy.com.ua/uk/vocabulary/%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0/>
2. Степанчиков Д.М. Алгоритми керування вітроенергетичною установкою на основі нечіткої логіки / Степанчиков Д.М - Математичне моделювання фізичних і технологічних процесів і технічних систем ХНТУ, 2018 р. УДК 697.133 [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.researchgate.net/publication/340789952_FUZZY_L...NE_GENERATOR_CONTROL
3. Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії: монографія / С. О. Кудря. – Житомир: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с. ISBN 978-966-999-077-8
4. Полянський О. В. Напрями розвитку альтернативних джерел енергії, акцент на твердому біопаливі та гнучких технологіях його виготовлення : монографія. [за заг. ред. В. І. Д'яконова] / О. В. Полянський. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 136 с. ISBN 978-966-695-411-7
5. Вітроенергетика [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://saee.gov.ua/uk/ae/windenergy>
6. Півняк Г. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. ISBN 978-966-350-526-8.
7. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни [Електронний ресурс] – Режим доступу: (<https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>)
8. Голик О. П. Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії. Частина 1 : навч. посіб. / О. П. Голик, Р. В. Жесан, І. В. Волков, та ін. – Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2020. – 192 с.
9. Паламарчук О. П. Прогнозування виробітку електричної енергії вітро

енергетичною установкою. Наук. праці / О. П. Паламарчук – Київ: «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2020. – 196 с.

10. Вітрова енергетика в Україні та світі [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://hmarochos.kiev.ua/2022/01/18/vitrova-energetyka-v-ukrayini-ta-sviti/>.

11. Горбуль А. В. Розробка вітрової електростанції для живлення електричних навантажень промислового підприємства. 2021, с 71

12. Мегавати війни: втрати, здобутки та перспективи вітроенергетики в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eco.rayon.in.ua/topics/533793-megavati-viyni-vtrati-zdobutki-ta-perspektivi-vitroenergetiki-v-ukraini>

13. Андрій Конеченков: за два роки війни введено близько 230 МВт вітрогенерації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua-energy.org/uk/posts/andrii-konechenkov-za-dva-roky-viiny-vvedeno-blyzko-230-mvt-vitroheneratsii>

14. Укрінформ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/>

15. Артемчук С. В. Порядок оцінки вітроенергетичного потенціалу під час розміщення вітроенергетичних установок біля республіки / С. В. Артемчук. – Мінськ: Мінприроди, 2012. – 19 с.

16. Brower M.C. Wind resource assessment: A practical guide to developing a wind project / M. C. Brower. – John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 290 p

17. Дмитренко Л. В. Вітроенергетичні ресурси в Україні / Л. В. Дмитренко, С. Л. Барандіч. – Наук. праці УкрНДГМІ. – 2007. – Вип. 256. – С. 166–173.

18. Акбаров Х. Б. Рекомендації щодо визначення кліматичних характеристик вітроенергетичних ресурсів / Х. Б. Акбаров. – Л.: Гідрометеоздат, 1989. – 80 с.

19. Кудря С.О. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с.

20. Кузьміна М. М. Розвиток вітроенергетики в Україні / М. М. Кузьміна НЮУ - ім. Ярослава Мудрого, Харків,- с.7 УДК 346.9:620.9

21. Вітроенергетичний потенціал України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.wikidata.ukua.nina.az/Вітроенергетичний_потенціал_України.html
22. Адаменко Я. О. Обґрунтування найкращих технологій використання вітрової енергії доступних для впровадження у карпатському регіоні / Адаменко Я. О. // Екологічна безпека та збалансоване ресурс користування. - 2016. – № 1, с.149-157– Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebzp_2016_1_21
23. Мхітарян Н. М. Енергетика нетрадиційних та відновлюваних джерел. Досвід та перспективи: монографія / Н. М. Мхітарян – К: Наукова думка, 1999. – 317.
24. Кравчишин В. С. Моделювання енергетичного потенціалу вітрової електричної станції / В. С. Кравчишин, М. О. Медиковський, М. О. Галушак // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Інформаційні системи та мережі. – 2016.– № 854.– с.80-87.
25. Ошурок Д. О. Кліматологічна оцінка вітроенергетичних ресурсів обмежених територій / Д. О. Ошурок // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2017. – Т. 1 (44). – С. 120–130.
26. Безруких П. П., Безруких П. П. (мл.), Грибков С. В. Ветроэнергетика: Справочно-методическое издание / П. П. Безруких, П. П. Безруких (мл.), С. В. Грибков. – М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетик», 2014. – 304 с.
27. Агапова О. Л. Картографування для потреб альтернативної енергетики в Україні: дисертація / О. Л. Агапова – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2016. – 230 с.
28. Nawri N. The wind energy potential of Iceland / N. Nawri, G. N. Petersen, H. Bjornsson et al. // Renewable Energy. –2014. –№ 69. –Р. 290–299.
29. Kaltschmitt, M. Renewable Energy: Technology, Economics and Environment. / M. Kaltschmitt, W. Streicher, A. Wiese. – Springer, 2007. – 564 p.
30. Анапольская Л. Е. Ветроэнергетические ресурсы и методы их оценки. / Л. Е. Анапольская, Л. С. Гандин // Метеорология и гидрология. – 1978. –№ 7.

– с. 11–17.

31. Hueging H. Regional Changes in Wind Energy Potential over Europe Using Regional Climate Model Ensemble Projections / H. Hueging, R. Haas, K. Born et al. // Journal of applied meteorology and climatology. – 2013. – Vol. 52, I. 4. – P. 903–917.

32. Індустрія вітроенергетики в Україні набирає оберти [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://energytransition.in.ua/industriya-vitroenergetyky-v-ukrayini/>.

33. Кравчишин В. С. Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії / В. С. Кравчишин. – Львів, 2019. – с. 197.

Кравчишин В. С. Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії : дис. ... кандидат технічних наук : спец.. 05.13.06 – Інформаційні технології : захищена 02.07.2019; . Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2019.– 197 с.

34. Fuhrländer F L 2500/100 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/347-fuhrlaender-fl-2500-100>.

35. Manufacturers and turbines > Fuhrländer > FL 2500/100 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.thewindpower.net/turbine_en_154_fuhrlander_fl-2500-100.php

36. Вітрогенератор [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.thewindpower.net/turbine_en_1076_vestas_v112-3075.php

37. [Manufacturers and turbines Vestas](#) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.thewindpower.net/turbine_en_595_vestas_v117-3300.php

38. Talari S. Stochastic modelling of renewable energy sources from operators point of-view: A survey / S. Talari, M. Shafie-khah, G. J. Osório // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 81. – P. 1953–1965.

39. Dai H. A Literature Review of Stochastic Programming and Unit Commitment. Journal of Power and Energy Engineering / H. Dai, N. Zhang, W. Su // Journal of Power and Energy Engineering. – 2015. – Vol. 3, No. 4. – P. 206–214.

40. Podhurenko V. S. Mathematical model of wind turbine electricity production as

a method of increasing its efficiency / V. S. Podhurenko, O. M. Getmanets, V. E. Terekhov // *Electronic Modeling*. –2018. – V. 40. – №2. – P. 121-127.

41. Манусов В. З. Прогнозування потужності вітроенергетичної установки з урахуванням кліматичних факторів / В.З Манусов, К. М Бойко // Збірник наукових праць за матеріалами XVIII Всеукраїнської науково-технічної онлайн-конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» 29-30 вересня 2020 року.

42. Божко К. Нечітка модель дисперсного складу твердих часток для Оцінювання запиленості атмосферного повітря / К. Божко, І. Морозова УДК 504.3.054: 681.518.2

43. Богатіков В.Н. Побудова систем управління на основі нейронних мереж: навчальний та методологічний посібник / В.Н. Богатіков, Л.В. Дранішніков, А.Е. Пророки. – Апатити: Видавничий дім KF Peter Gu, 2011. – 41 с.

44. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с. ISBN 5-93517-031-0.

45. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М.: Горячая шния - Телеком, 2007. – 288 с, ил.

46. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – Пер. с англ. Н.И. Ринго под ред. Н.Н. Моисеева. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

47. Гафаров Ф. М Штучні нейронні мережі та додатки: навч. посібник / Ф. М. Гафаров, А.Ф. Галимянов. – Казань: Вид-во Казанського ун-ту, 2018. – 121с.

48. Леоненков А. В. Нечітке моделювання у середовищі MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.: ил.

49. Technical Specification for Independent Power Producers: – Energie NB Power. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.nbpower.com/Welcome.aspx>.

50. Дранишников Л. В. Інтелектуальні методи в управлінні: навчальний

посібник / Л. В. Дранишников. – Кам'янське: ДДТУ, 2018. – 416 с.

51. Jang, J. R. ANFIS: Adaptive-Network Based Fuzzy Inference System / J. R. Jang // IEEE Trans. Systems & Cybernetics. – 1993. – Vol.23. – P.665–685.

52. Жученко А. І. Інтелектуальні системи управління. Лабораторний практикум/ Відп. редактор Жученко А. І., Укладачі Ярощук Л. Д. Бородін В. І. – Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018, – с.81

53. Суботін С .О Методичні вказівки до лабораторних занять з курсу "Нечіткі моделі і методи обчислювального інтелекту. Системи штучного інтелекту» / Уклад.: С.О. Субботін. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. – 50 с.

54. Богомолова О.С. Методи та моделі оцінки потужності сонячної та вітрової генерації у вузлах електричної мережі – електричні станції, мережі і системи: дисертація / О.С. Богомолова. – Київ: «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2021. – 155 с.