

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАНЦІЇ НА БАЗІ
FUZZY-ЛОГІКИ ДЛЯ УМОВ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Виконав: здобувач групи ЗЕЕМ-23-ск

Сергій ПОХОДАЙ

Керівник випускної роботи _____ д-р ф-ї, ст. викладач Олег ДОЗОРЕНКО

Нормоконтролер _____ д-р ф-ї, ст. викладач Олег ДОЗОРЕНКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Походай Сергія Сергійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система управління вітроенергетичної станції на базі Fuzzy-логіки для умов гірничорудних підприємств.

2. Строк подання студентом роботи 11 червня 2026 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Мета роботи – розробка та моделювання системи управління вітроенергетичної станції на базі Fuzzy-логіки для підвищення стабільності її роботи в умовах змінної швидкості вітру, несталого навантаження та особливостей електропостачання гірничорудних підприємств.

Завдання кваліфікаційної роботи: розглянути загальну характеристику ВЕУ і ВЕС, їх призначення, класифікацію та основні схеми роботи; проаналізувати особливості використання ВЕС в умовах гірничорудних підприємств; дослідити режими роботи ВЕС у системах електропостачання промислових підприємств; обґрунтувати доцільність використання Fuzzy-логіки в системах автоматичного керування ВЕУ в умовах змінної швидкості вітру та несталого навантаження; розробити структурну схему ВЕС для умов гірничорудного підприємства; визначити вхідні та вихідні змінні системи Fuzzy-керування ВЕС; сформувати базу нечітких правил для керування батареєю додаткових конденсаторів і баластним навантаженням; побудувати Fuzzy-модель системи управління ВЕС та виконати моделювання роботи системи керування; проаналізувати результати моделювання Fuzzy-керування ВЕС і оцінити ефективність запропонованої системи стабілізації вихідних параметрів ВЕУ.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

1. Загальна характеристика ВЕУ та ВЕС; 2. Особливості використання ВЕС в умовах гірничорудних підприємств; 3. Режими роботи ВЕС у системах електропостачання промислових підприємств; 4. Обґрунтування використання нечіткої логіки в системах автоматичного керування ВЕУ; 5. Структурна схема ВЕС для умов гірничорудного підприємства; 6. Визначення вхідних і вихідних змінних системи Fuzzy-керування; 7. Формування бази нечітких правил для керування конденсаторними батареями та баластним навантаженням; 8. Побудова Fuzzy-

моделі системи керування ВЕС; 9. Аналіз результатів моделювання Fuzzy-керування ВЕС.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Узагальнені схеми роботи ВЕС у системах електропостачання промислових підприємств; 2. Порівняльна характеристика потенційних зон розміщення ВЕУ; 3. Структурна логіка автоматичного вибору режиму роботи ВЕС; 4. Функціональна структура нечіткого регулятора в системі керування ВЕУ; 5. Структурна схема ВЕС; 6. Характеристика входних і вихідних параметрів математичної моделі нечіткого висновку щодо напруги керування симісторними ключами; 7. База знань нечітких правил для БДК та ББН; 8. Діалогові вікна формування бази правил; 9. Результати моделювання залежності напруги завдання для БДК та ББН від параметрів генератора та споживача.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Дозоренко О.В.		
II	Дозоренко О.В.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Аналіз актуальності використання ВЕС у системах електропостачання гірничорудних підприємств	21 травня 2026 р.
2	Дослідження особливостей ВЕУ, ВЕС та умов їх застосування на території ГЗК	24 травня 2026 р.
3	Аналіз режимів роботи ВЕС і обґрунтування доцільності застосування Fuzzy-логіки	28 травня 2026 р.
4	Розробка структурної схеми ВЕС для умов гірничорудного підприємства	31 травня 2026 р.
5	Визначення змінних Fuzzy-регулятора та формування бази нечітких правил	3 червня 2026 р.
6	Побудова Fuzzy-моделі системи керування ВЕС і проведення моделювання	6 червня 2026 р.
7	Аналіз результатів моделювання, формулювання висновків та оформлення пояснювальної записки	10 червня 2026 р.

Дата видачі завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Сергій ПОХОДАЙ

(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Олег ДОЗОРЕНКО

(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Система управління вітроенергетичної станції на базі Fuzzy-логіки для умов гірничорудних підприємств» містить: 55 с., 18 рис., 8 табл., 30 літературних джерел.

Робота присвячена розробці та моделюванню системи управління вітроенергетичної станції на базі Fuzzy-логіки для умов гірничорудних підприємств. Основну увагу приділено аналізу можливостей використання вітроенергетичних установок у системах електропостачання промислових підприємств, особливостям їх роботи в умовах кар'єрів, відвалів і промислових майданчиків, а також формуванню нечіткої системи керування для стабілізації параметрів вітроенергетичної установки.

Об'єкт дослідження – режими роботи вітроенергетичної станції у складі системи електропостачання гірничорудного підприємства.

Мета роботи – розробка та моделювання системи управління вітроенергетичної станції на базі Fuzzy-логіки для підвищення стабільності її роботи в умовах змінної швидкості вітру, несталого навантаження та особливостей електропостачання гірничорудних підприємств.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованої системи керування для підвищення ефективності роботи вітроенергетичних станцій у локальних і частково автономних системах електропостачання гірничорудних підприємств. Результати моделювання можуть бути застосовані під час вибору алгоритмів керування вітроенергетичними станціями, формування бази нечітких правил, стабілізації напруги та частоти, а також керування підключенням конденсаторних батарей і баластного навантаження.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.Р		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Походай С.С.			Реферат	Літ.	Арк.
Перевірів		Дозсренко О.В.					5
							2
Н. Контр.		Дозсренко О.В.				КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск	
Затвердж.		Пересунько І.І.					

У першому розділі розглянуто загальну характеристику вітроенергетичних установок і вітроенергетичних станцій, їх класифікацію, схеми роботи та особливості використання в умовах гірничорудних підприємств. Проаналізовано потенційні зони розміщення вітроенергетичних установок на території гірничорудних підприємств, зокрема кар'єри, відвали, промислові майданчики та периферійні відкриті ділянки. Розглянуто режими роботи вітроенергетичних станцій у системах електропостачання промислових підприємств, а також обґрунтовано доцільність використання нечіткої логіки в системах автоматичного керування вітроенергетичними установками.

У другому розділі розроблено структурну схему вітроенергетичної станції для умов гірничорудного підприємства. Визначено вхідні та вихідні змінні системи Fuzzy-керування, сформовано базу нечітких правил для керування батареями додаткових конденсаторів і баластним навантаженням. Побудовано Fuzzy-модель системи керування вітроенергетичною станцією у середовищі Matlab, виконано налаштування функцій належності, реалізовано базу правил нечіткого логічного висновку та проаналізовано результати моделювання. Отримані залежності показали плавний характер зміни керувального сигналу, що підтверджує доцільність використання Fuzzy-регулятора для стабілізації режимів роботи вітроенергетичних установок.

У висновках наведено основні результати виконаної роботи та підтверджено доцільність застосування Fuzzy-логіки для керування вітроенергетичними станціями в умовах гірничорудних підприємств.

ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНА МЕРЕЖА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, FUZZY-ЛОГІКА, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ПРОМИСЛОВІ ПІДПРИЄМСТВА

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.Р	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ НА ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ	9
1.1 Загальна характеристика вітроенергетичних установок і станцій	9
1.2 Особливості використання вітроенергетичних станцій в умовах гірничорудних підприємств	13
1.3 Режими роботи вітроенергетичних станцій у системах електропостачання промислових підприємств	19
1.4 Обґрунтування використання нечіткої логіки в системах автоматичного керування вітроенергетичними установками.....	27
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАНЦІЇ НА БАЗІ FUZZY-ЛОГІКИ	32
2.1 Структурна схема вітроенергетичної станції для умов гірничорудного підприємства.....	32
2.2 Визначення вхідних і вихідних змінних системи Fuzzy-керування	34
2.3 Формування бази нечітких правил для керування батареями додаткових конденсаторів та баластним навантаженням.....	38
2.4 Побудова Fuzzy-моделі системи керування вітроенергетичною станцією.....	44
2.5 Аналіз результатів моделювання Fuzzy-керування вітроенергетичною станцією	48
ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.3					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст			Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив		Походай С.С.								
Перевірів		Дозсренко О.В.							7	1
								КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск		
Н. Контр.		Дозсренко О.В.								
Затвердж.		Пересунько І.І.								

ВСТУП

Одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності та енергетичної стійкості гірничорудних підприємств є використання локальних джерел генерації електроенергії (ЕЕ), зокрема вітроенергетичних станцій (ВЕС) [1–3]. В умовах гірничо-збагачувальних комбінатів вітроенергетичні установки (ВЕУ) можуть застосовуватися для часткового покриття власного електроспоживання, живлення віддалених або допоміжних споживачів, зменшення навантаження на зовнішню мережу та підвищення надійності електропостачання технологічних об'єктів [4]. Додатковою передумовою для такого використання є наявність відкритих територій, відвалів, промислових майданчиків і периферійних ділянок, придатних для розміщення вітроенергетичного обладнання.

Разом з тим робота ВЕС у системах електропостачання гірничорудних підприємств має низку особливостей [2]. Швидкість вітру є змінною та стохастичною величиною, а електричне навантаження промислових споживачів є нерівномірним і залежить від технологічного режиму роботи підприємства. У таких умовах ВЕУ є нелінійним і нестационарним об'єктом керування, для якого складно побудувати універсальний математичний опис усіх режимів роботи [5].

Актуальність теми роботи полягає в необхідності розроблення системи управління ВЕС, здатної забезпечувати стабілізацію вихідних параметрів ВЕУ в умовах змінної швидкості вітру та несталого навантаження. Одним із доцільних підходів до розв'язання цього завдання є використання Fuzzy-логіки, яка дозволяє формувати керуючі дії на основі лінгвістичних правил і працювати з наближеними або нечітко визначеними параметрами. Такий підхід придатний для систем керування, у яких рішення необхідно приймати не лише за жорсткими пороговими значеннями, а з урахуванням сукупності режимних ознак [6].

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.ВС				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вступ	Літ.	Арк.	Акрушіє	
Розробив		Походай С.С.							
Перевірів		Дозсренко О.В.					8	1	
						КНУ гр. 3ЕЕМ-23ск			
Н. Контр.		Дозсренко О.В.							
Затвердж.		Пересунько І.І.							

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ НА ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

1.1 Загальна характеристика вітроенергетичних установок і станцій

Основним призначенням ВЕУ є вироблення ЕЕ з відновлюваного джерела без спалювання палива. У промислових умовах такі установки можуть використовуватися для часткового покриття власного електроспоживання, живлення віддалених об'єктів, резервування окремих технологічних споживачів, заряджання акумуляторних батарей, живлення систем освітлення, зв'язку, моніторингу, вентиляції, насосного обладнання та засобів автоматизації. Призначення ВЕС є ширшим, оскільки вона забезпечує централізоване керування декількома ВЕУ, узгодження їх режимів, видачу потужності у внутрішню мережу підприємства та підтримання допустимих параметрів напруги і частоти [7]. Саме тому для промислових підприємств важливо розглядати не окрему ВЕУ, а комплексну систему генерування, керування та розподілу ЕЕ [8].

За встановленою потужністю ВЕУ доцільно поділяти на установки малої, середньої та великої потужності [7]. Така класифікація є зручною для вибору сфери застосування, типу електричної схеми, способу підключення та вимог до системи керування. Малі ВЕУ переважно використовуються для автономного живлення локальних об'єктів і мають відносно просту структуру. Середні установки можуть застосовуватися як джерела живлення окремих промислових ділянок або допоміжних систем. Великі ВЕУ, як правило, формують основу промислових ВЕС і потребують складнішої системи керування, захисту, перетворення ЕЕ та взаємодії з мережею.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.01		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1		
Розробив		Походай С.С.					
Перевірів		Дозсренко О.В.					
Н. Контр.		Дозсренко О.В.					
Затвердж.		Пересунько І.І.			КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск		
					Літ.	Арк.	Акрушів
						9	23

Таблиця 1.1 – Узагальнена класифікація ВЕУ за встановленою потужністю

Група ВЕУ	Орієнтовна потужність	Типові споживачі	Особливості застосування
Малої потужності	до 100 кВт	Локальні об'єкти, освітлення, зв'язок, моніторинг	Автономна робота, простіша схема, можливість використання АКБ
Середньої потужності	100 кВт – 1 МВт	Дільниці підприємства, насосні станції, допоміжні комплекси	Часткове покриття навантаження, робота з мережею або накопичувачем
Великої потужності	понад 1 МВт	Промислові ВЕС, групи значних споживачів	Складна система керування, захисту та інтеграції з мережею

ВЕУ малої потужності мають порівняно невеликі габарити, простіші умови монтажу та можуть працювати у складі автономних систем електроживлення. Їх доцільно використовувати для об'єктів, де прокладання кабельних ліній є економічно не вигідним або технічно складним [9]. Для гірничорудних підприємств це можуть бути пости контролю, системи відеоспостереження, освітлення віддалених ділянок, метеостанції або локальні засоби зв'язку [10].

ВЕУ середньої потужності вже можуть забезпечувати живлення групи споживачів, зокрема насосних станцій, допоміжних майстерень, адміністративно-побутових об'єктів або частини освітлювального навантаження. ВЕУ великої потужності доцільні тоді, коли підприємство має значну площу, відкриті території, стійкий вітровий потенціал і можливість інтегрувати ВЕС у внутрішню систему електропостачання [2, 11].

За конструкцією вітроколеса ВЕУ поділяють на горизонтально-осьові та вертикально-осьові [7]. Горизонтально-осьові ВЕУ є найбільш поширеними у промисловій вітроенергетиці. Їх вісь обертання розташована приблизно паралельно напрямку вітрового потоку, тому для ефективної роботи потрібна система орієнтації гондоли за напрямом вітру. Такі установки мають високий коефіцієнт використання енергії вітру, добре відпрацьовану конструкцію та широкий діапазон потужностей.

Вертикально-осьові ВЕУ мають вісь обертання, розташовану вертикально, що дає їм змогу сприймати вітровий потік з різних напрямів без складної системи орієнтації [7]. Вони можуть бути перспективними для складних промислових територій, де напрям вітру змінюється під впливом кар'єрів, відвалів, будівель і технологічних споруд.

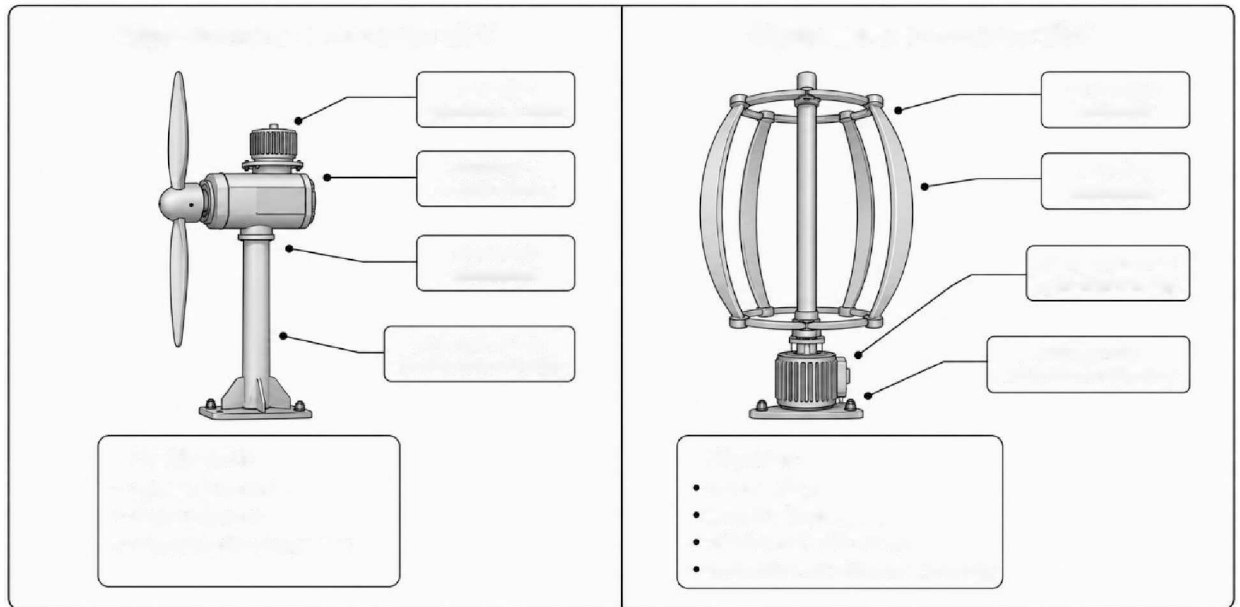


Рисунок 1.1 – Порівняння горизонтально- та вертикально-осьових ВЕУ

За схемою роботи ВЕС можуть бути автономними, мережевими та комбінованими.

Автономна схема передбачає живлення споживачів без безпосереднього паралельного зв'язку із зовнішньою енергосистемою. У такому випадку обов'язковими елементами стають акумуляторні батареї або інші накопичувачі енергії, оскільки швидкість вітру змінюється, а споживач потребує стабільного живлення [12].

Мережева схема передбачає роботу ВЕС паралельно з електричною мережею. У цьому випадку вироблена енергія може споживатися безпосередньо підприємством, а дефіцит потужності покривається від мережі.

Комбінована схема поєднує переваги двох підходів: ВЕС працює із накопичувачем, локальним навантаженням і можливістю резервного живлення від мережі [8].

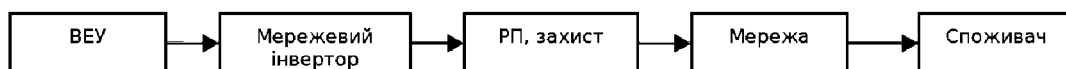
Таблиця 1.2 – Порівняння основних схем роботи ВЕС

Схема роботи	Основні елементи	Переваги	Обмеження
Автономна	ВЕС, контролер, АКБ, інвертор, локальне навантаження	Енергетична незалежність віддалених об'єктів	Потреба у накопичувачах та резервуванні
Мережева	ВЕС, мережевий інвертор, захист, внутрішня або зовнішня мережа	Ефективне використання виробленої енергії	Залежність від вимог мережевого приєднання
Комбінована	ВЕС, АКБ, інвертор, АВР, мережа, споживач	Поєднання автономності та резервного живлення	Складніша система керування і захисту

а) автономна



б) мережева



в) комбінована

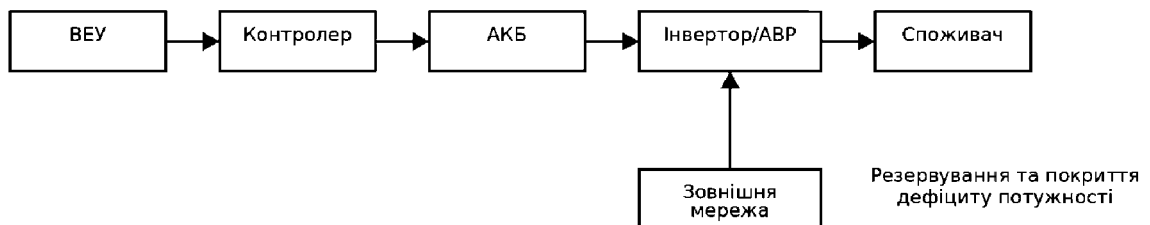


Рисунок 1.2 – Узагальнені схеми роботи ВЕС у системах електропостачання

Для промислових підприємств переваги ВЕС полягають не лише у зменшенні споживання ЕЕ із зовнішньої мережі. Вітрова генерація може підвищити енергетичну автономність підприємства, знизити втрати в довгих лініях живлення віддалених об'єктів, забезпечити резервування відповідальних споживачів і зменшити залежність від коливань тарифів на ЕЕ. Додатковою перевагою є екологічний ефект, оскільки вироблення ЕЕ відбувається без прямих викидів продуктів згоряння. Для підприємств, які мають великі промислові

майданчики, відкриті площі, відвали або кар'єрні простори, ВЕС також може стати елементом комплексної програми енергоефективності [13].

Особливу актуальність використання ВЕС має для підприємств гірничорудного комплексу [14]. Такі підприємства характеризуються значною встановленою потужністю електроприймачів, розосередженим розміщенням технологічних об'єктів, наявністю кар'єрів, відвалів, підстанцій, дробильно-сортувальних комплексів, конвеєрних ліній, насосних станцій та систем освітлення [15–16]. Частина цих споживачів може бути віддалена від головних центрів живлення, що призводить до додаткових втрат ЕЕ та ускладнює резервування. За наявності достатнього вітрового потенціалу розміщення ВЕУ на відкритих ділянках, поблизу відвалів або на промислових майданчиках може забезпечити часткове покриття локального навантаження.

Водночас умови гірничорудних підприємств є складними для традиційних систем керування ВЕС. Повітряні потоки в районі кар'єрів і відвалів можуть мати змінну швидкість, турбулентність і різні напрями [2, 4]. Навантаження підприємства також є нерівномірним, оскільки залежить від технологічного режиму роботи обладнання. Тому система керування ВЕС повинна швидко реагувати на зміну швидкості вітру, напруги, частоти, навантаження та режиму роботи генератора. У таких умовах перспективним є застосування інтелектуальних алгоритмів, зокрема Fuzzy-логіки, яка дає змогу формувати керуючі дії за наближеними експертними правилами навіть за неповної або нечіткої інформації про стан об'єкта [6].

Важливою особливістю промислового застосування ВЕС є необхідність узгодження режимів роботи вітрогенераторів із режимами електроприймачів підприємства. На гірничорудних об'єктах навантаження може змінюватися стрибкоподібно внаслідок пуску електродвигунів дробарок, насосів, конвеєрів, компресорів або допоміжних механізмів. У таких умовах ВЕС не повинна погіршувати якість ЕЕ у внутрішній мережі [17]. Тому під час її проектування необхідно враховувати допустимі відхилення напруги, частоти, можливі коливання потужності, роботу пристроїв компенсації реактивної потужності,

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.01	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

захист від перевантажень і аварійне відключення при небезпечних швидкостях вітру.

Окрему роль відіграє система автоматичного керування, яка забезпечує контроль технічного стану ВЕУ, перемикання режимів роботи, підключення або відключення накопичувачів, регулювання напруги та взаємодію з навантаженням [18].

Для традиційних регуляторів складність полягає в тому, що вітровий потік має випадковий характер, а точне математичне описання всіх зовнішніх впливів є ускладненим. Саме тому в сучасних системах керування доцільно застосовувати алгоритми, здатні працювати з неповною та наближеною інформацією. Fuzzy-логіка у цьому випадку є зручним інструментом, оскільки дає змогу формувати керуючі рішення на основі правил типу «якщо – то», наближених до логіки дій оператора або інженера-енергетика [6].

Отже, ВЕУ та ВЕС для гірничорудного підприємства слід розглядати не лише як джерело відновлюваної енергії, а як керований елемент системи електропостачання. Ефективність такого елемента визначається правильним вибором потужності, конструкції, схеми підключення, місця розташування, накопичувачів енергії та алгоритму керування.

1.2 Особливості використання вітроенергетичних станцій в умовах гірничорудних підприємств

Використання ВЕС в умовах гірничорудних підприємств має розглядатися не лише як встановлення окремих ВЕУ на вільних площах, а як елемент удосконалення системи електропостачання промислового об'єкта [1, 4, 19].

Як зазначено раніше, споживачі ЕЕ гірничорудного комплексу характеризуються значним і нерівномірним споживанням ЕЕ. Водночас території таких підприємств часто мають відкриті простори, штучно сформований рельєф, відвали, борти кар'єрів і технологічні майданчики, які можуть впливати на локальний вітровий режим [2]. Тому доцільність використання ВЕС у таких умовах визначається не тільки середньорічною

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.01	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкістю вітру, а й просторовою організацією підприємства, режимами роботи електроприймачів та можливістю інтеграції генеруючих установок у внутрішню електричну мережу.

Територія гірничорудного підприємства, на відміну від міської або сільськогосподарської території, має виражену функціональну зональність. До її складу входять кар'єр або група кар'єрів, зовнішні та внутрішні відвали, промислові майданчики, підстанції, транспортні комунікації, склади, насосні станції, адміністративно-побутові об'єкти та допоміжні споруди [20]. Частина цих зон не може використовуватися для встановлення ВЕУ через технологічні, вибухові, транспортні або санітарні обмеження.

Проте значні площі відвалів, рекультивованих ділянок, периферійних промислових майданчиків і відкритих територій поблизу розподільчих пристроїв можуть бути потенційно придатними для розміщення ВЕС. Особливу увагу слід приділяти таким ділянкам, де є достатній вітровий ресурс, мінімальний ризик затінення потоку спорудами і можливість економічного підключення до електричної мережі підприємства [21].

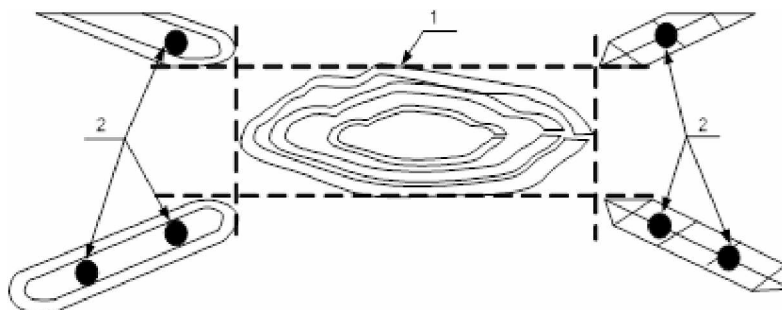


Рисунок 1.3 – Схема розташування ВЕУ на відвалах гірничорудного підприємства: 1 – кар'єр; 2 – ВЕУ на відвалах

Кар'єри та відвали формують складну аеродинамічну обстановку. Відкритий простір сприяє проходженню повітряних мас, однак борти кар'єру, уступи, відвали та великі будівлі можуть як підсилювати, так і послаблювати вітровий потік [2, 4]. На вершинах відвалів або на підвищених ділянках

швидкість вітру, як правило, є більшою, ніж у понижених зонах, оскільки зменшується вплив поверхневого тертя та локальних перешкод.

Водночас за відвалами й великими спорудами можуть утворюватися зони аеродинамічної тіні, турбулентності та рециркуляції [2, 4, 19]. Для ВЕУ це має принципове значення, оскільки надмірна турбулентність збільшує динамічні навантаження на лопаті, вежу, генератор і систему керування.

Як потенційні зони встановлення ВЕУ на ГЗК доцільно розглядати три основні групи об'єктів: відвали, промислові майданчики та периферійні відкриті ділянки поблизу електричних мереж [4, 21]. Відвали є привабливими завдяки підвищеному положенню над навколишньою місцевістю та меншій забудованості.

Промислові майданчики зручні з точки зору підключення, обслуговування та доступу ремонтного персоналу, але можуть мати значну кількість перешкод для вітрового потоку.

Периферійні ділянки дають можливість розміщення декількох ВЕУ з дотриманням відстаней між ними, однак потребують оцінювання довжини кабельних ліній, втрат ЕЕ та надійності підключення. Загальна логіка вибору місця полягає у поєднанні енергетичних, електротехнічних, технологічних та експлуатаційних критеріїв [19].

Таблиця 1.3 – Основні критерії вибору місця встановлення ВЕУ на території ГЗК

Критерій	Зміст вимоги для умов ГЗК
Вітровий ресурс	Стабільна повторюваність робочих швидкостей вітру, мінімальний вплив аеродинамічної тіні та надмірної турбулентності.
Рельєф і відкритість	Перевага надається підвищеним ділянкам, вершинам або гребеням відвалів, відкритим промисловим зонам.
Електричне підключення	Близькість до РП, КТП, ГПП або внутрішніх мереж 0,4–10 кВ для зменшення втрат і вартості кабельних ліній.
Безпека	Відсутність конфлікту з вибуховими роботами, транспортом, складами, зонами падіння породи та маршрутами техніки.
Експлуатація	Можливість під'їзду, монтажу, технічного обслуговування, контролю стану ВЕУ та системи керування.

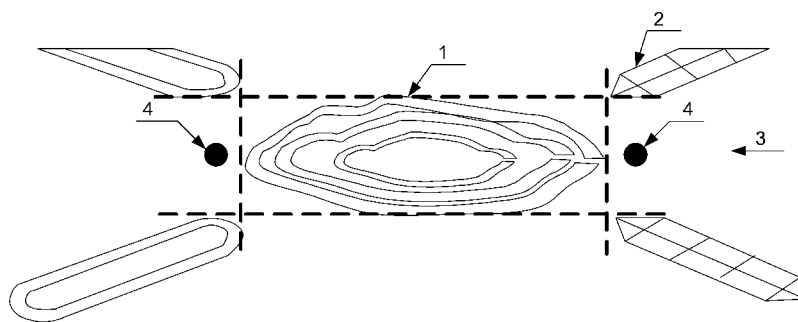


Рисунок 1.4 – Схема раціонального розташування поверхневих споруд і відвалів з урахуванням напрямку вітрового потоку: 1 – кар'єр; 2 – відвали; 3 – напрям вітру; 4 – поверхневі споруди ГЗК

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика потенційних зон розміщення ВЕУ

Зона території	Переваги	Обмеження
Вершини та гребені відвалів	Підвищена швидкість вітру, менше екранування, можливість встановлення кількох ВЕУ	Потрібна оцінка стійкості основи, під'їзду та турбулентності
Промислові майданчики	Близькість до електричних мереж і персоналу, простіше обслуговування	Можливе екранування будівлями, транспортні та виробничі обмеження
Периферійні відкриті ділянки	Достатні площі, менший вплив технологічних процесів	Збільшення довжини кабельних ліній і потреба в охороні обладнання
Рекультивовані території	Можливість повторного використання земель, екологічний ефект	Необхідна перевірка несучої здатності ґрунтів і правового статусу ділянки

Для гірничорудних підприємств найбільш реалістичним є не повне заміщення зовнішнього електропостачання, а часткове покриття навантаження окремих споживачів або груп електроприймачів [22]. До таких споживачів можуть належати освітлення кар'єрних доріг і промислових майданчиків, системи відеоспостереження та зв'язку, малі насосні агрегати, пункти контролю, зарядні станції допоміжного обладнання, системи вентиляції або власні потреби розподільчих пунктів [15–16]. У разі застосування акумуляторних батарей ВЕС може забезпечувати автономне живлення відповідальних малопотужних споживачів у періоди зниження або відсутності напруги у зовнішній мережі.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Для потужних технологічних електроприймачів ГЗК, таких як екскаватори, дробарки, конвеєри великої продуктивності або головні насосні станції, використання ВЕС як єдиного джерела живлення переважно недоцільне через значну потужність і різкозмінний режим навантаження [1, 4, 20].

Проте ВЕС може працювати паралельно з внутрішньою мережею підприємства і зменшувати частку ЕЕ, що споживається з енергосистеми. Такий режим особливо перспективний для споживачів із відносно тривалим графіком роботи та для власних потреб, де важливо зменшити експлуатаційні витрати, підвищити енергетичну незалежність і забезпечити резервування окремих функцій.

Під час вибору місця встановлення ВЕУ необхідно враховувати не лише середні швидкості вітру, а й характер зміни швидкості за сезонами, добою та висотою [23]. Бажано проводити локальні вимірювання або використовувати результати метеомоніторингу саме на тій висоті, на якій передбачається розташування ротора [24]. Для кар'єрів і відвалів це особливо важливо, оскільки різниця у висоті між дном кар'єру, бортом, промисловим майданчиком і вершиною відвалу може істотно змінювати енергетичний потенціал.

Крім того, потрібно оцінювати напрям переважаючих вітрів, відстань від великих споруд, взаємний вплив кількох ВЕУ, можливість появи пилю, обмерзання, вібрацій і підвищених механічних навантажень [21].

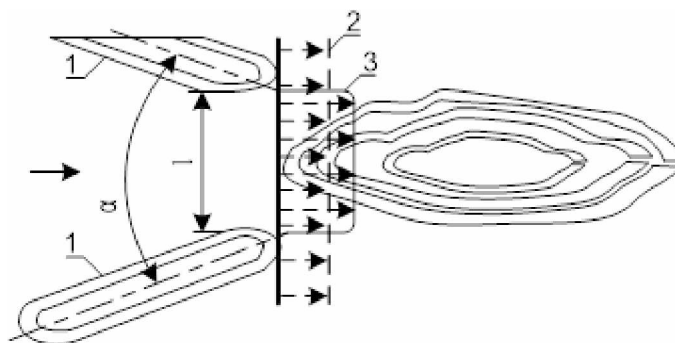


Рисунок 1.5 – Схематичне подання впливу відвалів і бортів кар'єру на повітряний потік: 1 – відвали; 2 і 3 – епюри швидкості вітрового потоку над кар'єром відповідно за відсутності і наявності повітрязабору

Відповідно до вищезазначеного, умови гірничорудних підприємств зумовлюють підвищені вимоги і до системи керування ВЕС. Вітер на таких територіях може бути поривчастим і турбулентним, а навантаження споживачів – змінним. Це створює потребу в автоматизованому керуванні, яке здатне адаптуватися до коливань швидкості вітру, напруги, частоти та стану навантаження.

Саме тому в подальшому доцільно розглядати застосування Fuzzy-логіки, яка дозволяє формувати керуючі дії в умовах неповної визначеності та нечіткої оцінки режимних параметрів. Для ВЕС на території ГЗК така система може виконувати функції стабілізації параметрів, керування підключенням навантаження, контролю акумуляторів, комутації компенсувальних пристроїв і захисту обладнання.

Для попереднього техніко-економічного обґрунтування доцільно застосовувати поетапний підхід. На першому етапі визначаються ділянки, де встановлення ВЕУ неможливе через гірничі роботи, переміщення великогабаритної техніки, вибухові зони, охоронні смуги повітряних і кабельних ліній, склади вибухових матеріалів або санітарні обмеження.

На другому етапі аналізуються ділянки з найкращими аеродинамічними умовами: відкриті площі, підвищені точки рельєфу, рекультивовані відвали, території за межами інтенсивного руху транспорту [4].

На третьому етапі оцінюється електротехнічна доцільність: відстань до розподільчого пункту, рівень напруги приєднання, можливість встановлення інвертора, захистів, засобів обліку та комутаційної апаратури. Такий підхід дозволяє уникнути ситуації, коли ділянка має добрий вітровий потенціал, але є непридатною з точки зору безпеки, підключення або подальшої експлуатації.

Окрему увагу необхідно приділяти режимам автономного та частково автономного живлення. Для повністю автономного режиму потрібні акумуляторні батареї або інші накопичувачі енергії, які компенсують нерівномірність генерації у безвітряні періоди [5, 18].

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.01	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такий варіант є доцільним для віддалених малопотужних об'єктів, де прокладання нової лінії електропередачі є економічно невигідним. Частково автономна схема є більш універсальною для ГЗК: ВЕС працює разом із внутрішньою мережею підприємства, а накопичувач або резервне живлення використовується для підтримання критичних споживачів. У цьому випадку ВЕС не повинна повністю покривати максимальне навантаження, але може зменшувати добове споживання з мережі, згладжувати пікові режими та підвищувати надійність живлення допоміжних систем.

Практична реалізація ВЕС на гірничорудному підприємстві також потребує врахування умов забруднення повітря пилом, можливого обмерзання, вібрацій від роботи кар'єрної техніки та обмежень щодо електромагнітної сумісності [19–20].

Пилове навантаження може впливати на стан лопатей, вентиляційних каналів, електричних шаф і датчиків, тому обладнання повинно мати відповідний ступінь захисту оболонок та можливість регулярного технічного огляду. Отже, вибір типу ВЕУ, висоти опори, системи керування та режиму експлуатації має виконуватися з урахуванням реальних виробничих умов конкретного ГЗК, а не тільки за узагальненими метеорологічними показниками.

Ефективність інтеграції ВЕС залежить від правильного вибору місця встановлення, урахування рельєфу, електричної віддаленості споживачів, характеру навантаження та якості системи керування. За таких умов ВЕС може стати додатковим джерелом ЕЕ для освітлення, зв'язку, власних потреб, малих насосних установок і допоміжних технологічних систем ГЗК, зменшуючи навантаження на зовнішню мережу та підвищуючи надійність електропостачання окремих об'єктів.

1.3 Режими роботи вітроенергетичних станцій у системах електропостачання промислових підприємств

ВЕС у складі системи електропостачання промислового підприємства може працювати в різних режимах, що змінюються залежно від швидкості вітру,

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.01	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електричного навантаження, стану акумуляторних батарей, параметрів зовнішньої мережі та технічного стану обладнання [5, 25].

Для умов гірничорудних підприємств це має особливе значення, оскільки споживачі ЕЕ розташовані розосереджено: частина з них знаходиться на промисловому майданчику, частина – у кар'єрі, на відвалах, насосних станціях, пунктах освітлення, зв'язку, диспетчеризації та моніторингу [4]. Тому вибір режиму роботи ВЕС повинен забезпечувати не лише вироблення ЕЕ, а й надійність, безпечність та якість живлення споживачів.

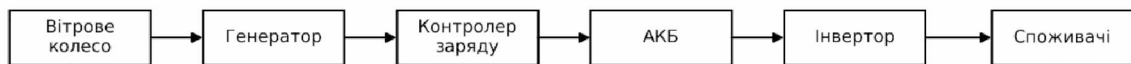
За способом взаємодії з електричною мережею режими роботи ВЕС доцільно поділяти на автономні, мережеві та комбіновані [7].

Автономний режим передбачає роботу станції ізольовано від зовнішньої енергосистеми. У такому випадку ЕЕ з ВЕУ, безпосередньо подається до локальних споживачів або накопичується в акумуляторних батареях [5, 7]. Цей режим є доцільним для живлення об'єктів, віддалених від головних розподільчих пунктів підприємства, наприклад систем освітлення відвалів, контрольно-вимірювальних пунктів, засобів зв'язку, автономних постів спостереження, локальних насосних або вентиляційних установок невеликої потужності.

Автономна робота ВЕС з акумуляторними батареями є найбільш стійкою для споживача, оскільки акумулятор виконує роль проміжної енергетичної ланки [5, 7–8]. За наявності достатньої швидкості вітру ЕЕ спрямовується на живлення навантаження та заряд батареї. У періоди зменшення швидкості вітру або короткочасного штилю живлення може підтримуватися за рахунок накопиченої ЕЕ. Для гірничорудного підприємства така структура підвищує автономність об'єкта, проте потребує контролю стану акумуляторів, оскільки відмова автономного джерела може призвести до втрати освітлення, зв'язку або контролю технологічної зони.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.01	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а) Автономна схема з акумуляторними батареями



Енергія від ВЕУ використовується для живлення локального навантаження та заряджання АКБ. У періоди зменшення швидкості вітру споживачі живляться від акумуляторних батарей через інвертор.

б) Робота ВЕС паралельно з мережею



Мережа підприємства компенсує дефіцит потужності або приймає надлишок генерації.

в) Робота ВЕС без акумуляторних батарей

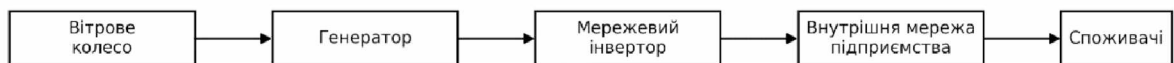


Схема не містить АКБ: вироблена електроенергія одразу передається у внутрішню мережу підприємства або безпосередньо на навантаження.

Рисунок 1.6 – Узагальнені схеми роботи ВЕС у системі електропостачання промислового підприємства

Робота ВЕС паралельно з мережею передбачає синхронну або перетворювальну взаємодію ВЕС з внутрішньою мережею підприємства [5, 7, 9]. У цьому режимі ВЕС може частково покривати власне навантаження, зменшуючи споживання ЕЕ з енергосистеми. Якщо ж потужність вітрової генерації нижча за поточну потребу, дефіцит покривається мережею. Якщо ж генерація перевищує локальне навантаження, надлишок може бути спрямований на інші споживачі підприємства, накопичення або обмеження виробітку. Такий режим потребує більш складної системи керування, оскільки необхідно контролювати напругу, частоту, напрям потоку потужності, стан комутаційної апаратури та умови безпечного підключення.

Окремо слід виділити роботу без акумуляторних батарей [8–9]. У такій схемі ВЕС, як правило, працює через мережевий інвертор, а зовнішня мережа фактично виконує роль джерела балансу потужності. Перевагою є менша вартість і простіша експлуатація, адже відсутня потреба у значному акумуляторному господарстві. У свою чергу, недоліком є залежність від стану

мережі: при її зникненні або порушенні параметрів ВЕС повинна автоматично відключатися або переходити в інший дозволений режим. Для промислових підприємств така схема є доцільною тоді, коли ВЕС використовується не як повністю автономне джерело, а як засіб зниження добового або сезонного споживання ЕЕ з мережі.

Комбінований режим поєднує переваги автономної та мережевої роботи. Він може передбачати наявність акумуляторних батарей, інверторів, автоматичного введення резерву, перемикання між живленням від ВЕС, батареї та зовнішньої мережі. Для ГЗК така схема є найбільш практичною, оскільки дозволяє жити відповідальні малопотужні споживачі навіть при нестійкому вітровому режимі, а також використовувати мережу як резерв у разі тривалого зниження генерації ЕЕ [1–4]. При цьому система керування повинна визначати, у який момент доцільно заряджати батареї, коли подавати ЕЕ на навантаження, коли залучати мережу, а коли переводити ВЕС у режим обмеження потужності.

Таблиця 1.5 – Порівняння основних схем роботи ВЕС

Схема роботи	Основна характеристика	Переваги для промислового підприємства	Обмеження
Автономна з АКБ	Живлення локальних споживачів із накопиченням енергії	Підвищення автономності віддалених об'єктів, резервування живлення	Потреба у контролі заряду, вартості та стану батарей
Паралельна з мережею	ВЕС працює разом із внутрішньою мережею підприємства	Зменшення споживання з енергосистеми, можливість покриття частини навантаження	Необхідні синхронізація, захисти та контроль якості ЕЕ
Без АКБ	Вироблена енергія одразу передається у мережу або навантаження	Менша вартість і простіша експлуатація	Залежність від наявності мережі та поточного вітру
Комбінована	Поєднання ВЕС, АКБ, мережі та автоматичного резервування	Найбільша гнучкість для відповідальних і розосереджених споживачів	Складніша система керування та комутації

У промислових системах електропостачання важливим є не тільки факт наявності додаткового джерела генерації, а й здатність цього джерела не

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.01	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

погіршувати показники якості ЕЕ. Під час роботи ВЕС можливі коливання напруги, зміна частоти на стороні генератора, нерівномірне навантаження перетворювачів і короточасні провали потужності, зумовлені нестабільністю вітрового потоку [4, 17, 19]. Тому у схемах електропостачання ГЗК доцільно передбачати інверторні перетворювачі, захисно-комутаційну апаратуру, блоки контролю якості ЕЕ та засоби погодження режимів ВЕС із режимами внутрішньої мережі підприємства.

З погляду внутрішньої динаміки роботи ВЕУ виділяють нормальний, стартовий, генераторний та аварійний режими [7]. Нормальний режим охоплює такі стани, за яких параметри вітру, генератора, перетворювача та навантаження знаходяться у допустимих межах. У межах нормального режиму установка може перебувати у стартовому або генераторному стані. Стартовий режим виникає тоді, коли швидкість вітру досягає мінімального значення, достатнього для початку обертання вітроколеса. У цей період установка ще не віддає номінальну потужність, але виконується розгін механічної частини, перевірка готовності генератора, контролера, інвертора та систем захисту.

Генераторний режим є основним робочим станом ВЕС [7]. Він настає після досягнення необхідної частоти обертання та формування напруги з параметрами, придатними для живлення споживача або передачі через перетворювач. У цьому режимі система керування повинна підтримувати оптимальне співвідношення між швидкістю вітру, моментом навантаження, вихідною напругою, частотою та потужністю. Для промислових споживачів важливо, щоб відхилення напруги і частоти не призводили до порушення роботи електроприймачів, особливо якщо йдеться про електроприводи, системи автоматики, освітлення або контрольно-вимірювальну апаратуру.

Таблиця 1.6 – Характеристика режимів роботи ВЕС

Режим	Умови виникнення	Основні дії системи керування
Стартовий	Швидкість вітру досягає пускового значення, але потужність ще не є номінальною	Контроль готовності обладнання, плавний розгін, підготовка до генерації

Генераторний	Параметри ВЕУ дозволяють віддавати електричну потужність	Підтримання напруги, частоти, потужності та оптимального навантаження генератора
Мережевий	ВЕС працює паралельно з внутрішньою мережею або використовує її як резерв	Синхронізація, контроль потоків потужності, перемикання джерел живлення
Аварійний	Перевищення допустимих параметрів або відмова елементів	Обмеження потужності, підключення баласту, відключення навантаження, гальмування

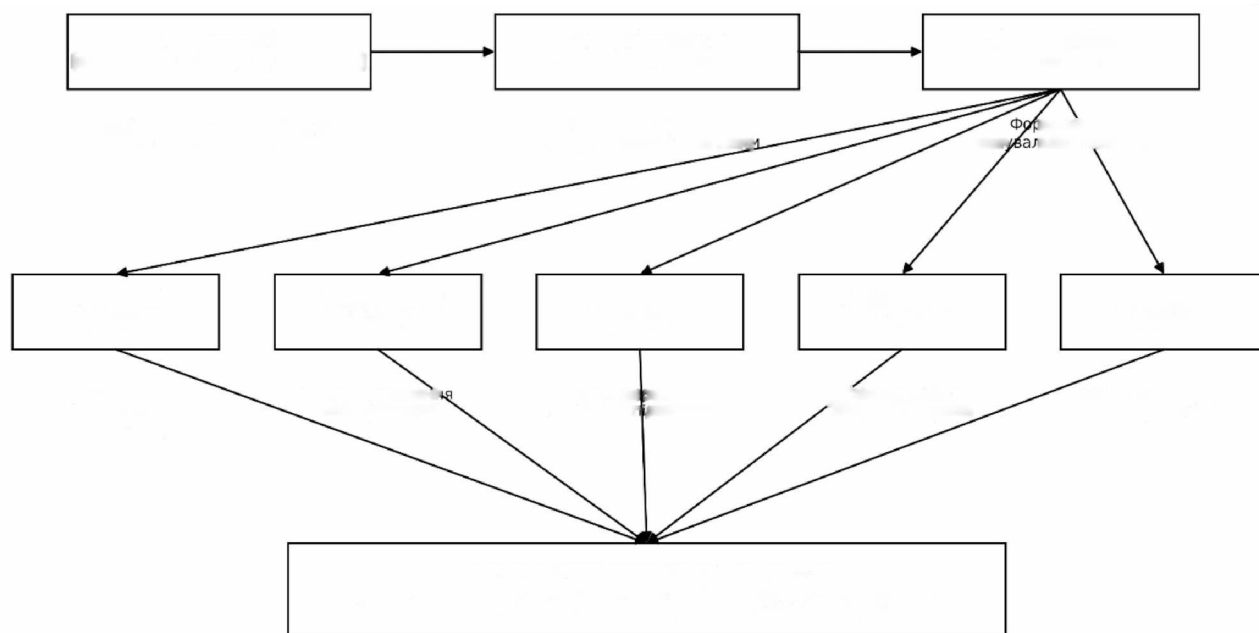


Рисунок 1.7 – Структурна логіка автоматичного вибору режиму роботи ВЕС

Аварійний режим виникає у разі перевищення допустимих параметрів або появи небезпечних відхилень [7]. До таких ситуацій належать надмірна швидкість вітру, перевищення частоти обертання, перенапруга, перевантаження інвертора, коротке замикання, втрата мережі, перегрів елементів, критичний розряд акумуляторів або відмова датчиків.

У таких випадках система переходить до захисних дій: обмеження потужності, підключення баластного навантаження, зміна режиму збудження, відключення частини навантаження, електричне або механічне гальмування, і за необхідності повний вихід установки з роботи. Особливо актуально це для відкритих гірничих робіт, де пориви вітру можуть бути різкими, а доступ персоналу до обладнання – ускладненим.

Для забезпечення стійкої роботи ВЕС необхідно контролювати не один, а декілька взаємопов'язаних параметрів. Наприклад, зниження швидкості вітру одночасно впливає на частоту обертання вітроколеса, електромагнітний момент генератора, вихідну потужність і можливість заряду акумуляторної батареї. Підвищення швидкості вітру, навпаки, може вимагати обмеження потужності або підключення баластного навантаження. Саме тому проста двопозиційна логіка типу «увімкнено - вимкнено» не завжди є достатньою для промислового об'єкта, де потрібні плавні керуючі впливи та прогнозоване перемикання режимів [4, 9].

Автоматичне керування режимами ВЕС є необхідною умовою її практичного використання на промисловому підприємстві. Ручне керування не може забезпечити достатньо швидко реакцію на зміну вітрового потоку, навантаження та мережевих параметрів. Крім того, у реальних умовах частина параметрів має нечіткий або невизначений характер: швидкість вітру може бути «низькою», «достатньою», «високою» або «критичною»; напруга може бути «нижче норми», «близька до норми» або «підвищена»; стан батареї може бути «достатнім» або «недостатнім» [18].

Саме тому для ВЕС доцільно застосовувати інтелектуальні методи керування, зокрема Fuzzy-логіку, яка дозволяє формувати керуючі дії на основі лінгвістичних правил і плавно переходити між режимами без жорстких порогових перемикань [5].

Наприклад, за умовою «якщо напруга нижча за норму, а частота близька до номінальної, то збільшити керуючий вплив на компенсуючий пристрій» можна сформулювати правило для стабілізації параметрів генерації ЕЕ. Такий підхід є зручним для ВЕС, оскільки враховує невизначеність вітрового потоку, допускає поступовість дії та дозволяє об'єднати досвід експлуатації з алгоритмом автоматичного регулювання.

Ефективність таких схем визначається якістю автоматичного керування. Це створює логічну передумову для розгляду у наступному розділі системи

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.01	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

управління ВЕС на базі Fuzzy-логіки, здатної враховувати змінність вітру, навантаження, стану мережі та накопичувача енергії.

1.4 Обґрунтування використання нечіткої логіки в системах автоматичного керування вітроенергетичними установками

ВЕУ є складним електромеханічним об'єктом, режим роботи якого визначається не лише параметрами генератора і навантаження, а насамперед станом вітрового потоку [4, 18]. На відміну від традиційних джерел ЕЕ, ВЕУ працює з первинною енергією, яка практично не піддається безпосередньому регулюванню.

Швидкість вітру змінюється за випадковим законом, має поривчастий характер, залежить від рельєфу місцевості, висоти розташування вітроколеса, турбулентності та наявності перешкод [24]. Для ВЕС в умовах гірничорудного підприємства, ця специфіка є особливо важливою, оскільки кар'єри, відвали, промислові майданчики та відкриті простори формують складну картину повітряних потоків. Тому система керування ВЕС повинна безперервно оцінювати стан об'єкта та приймати рішення в умовах невизначеності.

Однією з головних причин ускладнення керування ВЕУ є кубічна залежність потужності вітрового потоку від швидкості вітру [7]:

$$P_B = 0,5 \cdot \rho \cdot F \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V^3,$$

де ρ – густина повітря, F – площа, яку описує вітроколесо, C_p – коефіцієнт використання енергії вітру, λ – швидкохідність, β – кут встановлення лопатей, V – швидкість вітру.

Із цієї залежності видно, що навіть невелика зміна швидкості вітру призводить до істотної зміни доступної механічної потужності. Наприклад, збільшення швидкості вітру на 20 % теоретично може дати приріст потужності майже на 73 %. Водночас така зміна не завжди є корисною, оскільки надлишкова потужність може спричинити перевищення частоти обертання, зростання напруги, перевантаження генератора або необхідність підключення баластного навантаження.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.01	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для класичних систем автоматичного керування бажано мати точну математичну модель об'єкта. Проте для ВЕУ побудова такої моделі є складною. Аеродинамічна характеристика ротора є нелінійною; механічний момент залежить від швидкості, кута атаки лопатей, турбулентності та режиму навантаження; електрична частина змінює параметри залежно від типу генератора, конденсаторного збудження, стану інвертора, акумуляторної батареї або внутрішньої мережі підприємства. Крім того, у промислових умовах навантаження також не є сталим: частина споживачів може вмикатися короткочасно, частина працює циклічно, а частина потребує підвищеної надійності живлення [26].

Саме тому для керування ВЕС доцільно застосовувати нечітку логіку [27]. Fuzzy-регулятор не вимагає абсолютно точної аналітичної моделі об'єкта. Він дозволяє описати керування у вигляді набору експертних правил типу «якщо – то», які враховують якісні оцінки параметрів: «напруга знижена», «частота близька до номінальної», «швидкість вітру висока», «акумулятор заряджений недостатньо», «потужність навантаження зростає».

Таблиця 1.6 – Чинники ускладнення керування ВЕС та вимоги до регулятора

Особливість ВЕУ	Наслідок для роботи ВЕС	Вимога до системи керування
Нестабільність швидкості вітру	Коливання механічної потужності, напруги та частоти	Швидке оцінювання режиму та зміна керуючого впливу
Стохастичний характер навантаження	Неможливість точно передбачити миттєву потужність	Робота з неповними і наближеними даними
Нелінійність ВЕУ	Складність побудови універсальної аналітичної моделі	Використання правил і лінгвістичних оцінок
Зміна промислового навантаження	Перехід між автономним, мережевим і комбінованим режимами	Автоматичний вибір режиму роботи станції

Для системи керування ВЕС на базі Fuzzy-логіки доцільно використовувати декілька вхідних параметрів, таких як: відносне значення напруги генератора, відносне значення частоти, потужність навантаження,

швидкість вітру, стан заряду акумуляторної батареї та співвідношення між виробленою і спожитою потужністю [27].

У класичному регуляторі кожний із цих параметрів потребував би окремого каналу налаштування або жорсткого порогового алгоритму. Нечіткий регулятор дозволяє об'єднати ці оцінки в єдину логіку прийняття рішень, де керуючий сигнал формується з урахуванням загальної картини режиму, а не лише одного відхилення [28].



Рисунок 1.8 – Передумови застосування Fuzzy-керування у BEC

Процес нечіткого керування складається з кількох етапів [28]. На етапі фазифікації точні входні параметри перетворюються на ступені належності до певних лінгвістичних термів. Наприклад, напруга генератора може оцінюватися як «мала», «нормальна» або «підвищена», а частота – як «нижче норми», «норма» або «вище норми». Математично це можна записати у вигляді функції належності:

$$\mu_A(x) \in [0; 1],$$

де $\mu_A(x)$ показує, якою мірою значення x належить до нечіткої множини A .

Далі спрацьовує база правил, у якій задається логіка реагування системи [28]. Наприклад: якщо напруга генератора нижча за номінальну і частота також знижена, то доцільно підключити додаткову конденсаторну батарею; якщо

напруга та частота підвищені, то необхідно збільшити баластне навантаження або обмежити відбір потужності; якщо параметри близькі до номінальних, керуючий вплив має бути мінімальним. Після виконання нечіткого висновку результат переводиться у конкретне керуюче значення на етапі дефазифікації.

Таблиця 1.7 – Основні етапи нечіткого керування ВЕУ

Етап Fuzzy-керування	Зміст етапу	Приклад для ВЕС
Фазифікація	Перетворення точних значень у лінгвістичні терми	Уген: низька, нормальна, підвищена
База правил	Сукупність правил типу IF–THEN	Якщо U низька і f низька, підключити БК
Нечіткий висновок	Визначення узагальненого нечіткого рішення	Оцінювання доцільності підключення БК або БН
Дефазифікація	Перехід до конкретного керуючого сигналу	Значення сигналу для ключів, інвертора або навантаження

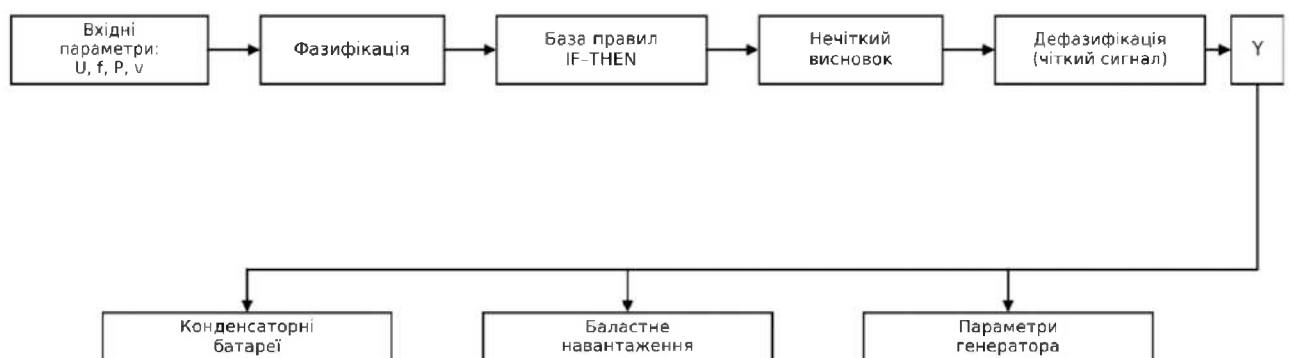


Рисунок 1.9 – Функціональна структура нечіткого регулятора в системі керування ВЕУ

Як зображено на рис. 1.9 керуючий сигнал Y визначає ступінь впливу на виконавчі елементи системи керування ВЕУ.

Особливо важливим є застосування Fuzzy-логіки для керування конденсаторними батареями [29]. У ВЕУ із асинхронними генераторами, що потребують реактивної потужності, конденсаторні батареї можуть підтримувати необхідний рівень напруги та поліпшувати умови збудження. Проте їх підключення не повинно бути грубим і випадковим. Якщо конденсаторна батарея підключається із запізненням, напруга може залишатися заниженою;

якщо вона підключається надмірно, можливе перенапруження. Fuzzy-регулятор дозволяє сформувати проміжні рішення: не просто «увімкнути» або «вимкнути», а визначити ступінь необхідності впливу залежно від відхилення напруги, частоти та поточного навантаження.

Не менш важливим є керування баластним навантаженням. У разі сильного вітру або раптового зменшення споживання в системі може виникнути надлишок генерованої потужності. Якщо його не відвести, зростають частота обертання, вихідна напруга та механічне навантаження на установку. Баластне навантаження виконує функцію керованого споживача, який приймає надлишкову енергію і стабілізує роботу ВЕУ. Нечітка логіка в цьому випадку дає змогу враховувати не тільки факт перевищення параметра, а й швидкість його зміни та близькість до аварійної зони [27–28]. Це підвищує плавність регулювання і зменшує кількість різких комутацій.

Порівняно з класичними пороговими або PID-алгоритмами, нечіткий регулятор краще пристосований до ситуацій, коли параметри не мають чіткої межі переходу між нормальним і небажаним станом [28]. Наприклад, швидкість вітру може бути не просто «достатньою» або «недостатньою», а помірною, підвищеною, близькою до критичної. Аналогічно напруга може бути трохи заниженою або суттєво заниженою. Завдяки цьому керування стає більш плавним і менш схильним до частих перемикань виконавчих елементів.

Використання Fuzzy-логіки у системах автоматичного керування ВЕС є обґрунтованим як практичний спосіб роботи з реальною невизначеністю. Для умов гірничорудного підприємства це дозволяє забезпечити більш стійке живлення віддалених споживачів, зменшити вплив поривчастості вітру, підвищити якість ЕЕ та сформувати основу для подальшого моделювання системи керування.

Саме тому в другому розділі роботи розглянуті особливості побудови моделі Fuzzy-регулятора, формування бази правил та аналізу результатів моделювання.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.01	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАНЦІЇ НА БАЗІ FUZZY-ЛОГІКИ

2.1 Структурна схема вітроенергетичної станції для умов гірничорудного підприємства

На рисунку 2.1 наведено структурну схему ВЕС, призначеної для роботи в умовах гірничорудного підприємства [30]. Схема відображає багаторівневу структуру ВЕС, у якій окремі ВЕУ об'єднані в єдиний електротехнічний комплекс із локальними системами керування, блоками датчиків, акумуляторними батареями власних потреб, розподільчим пристроєм та зв'язком із головною понижувальною підстанцією підприємства.

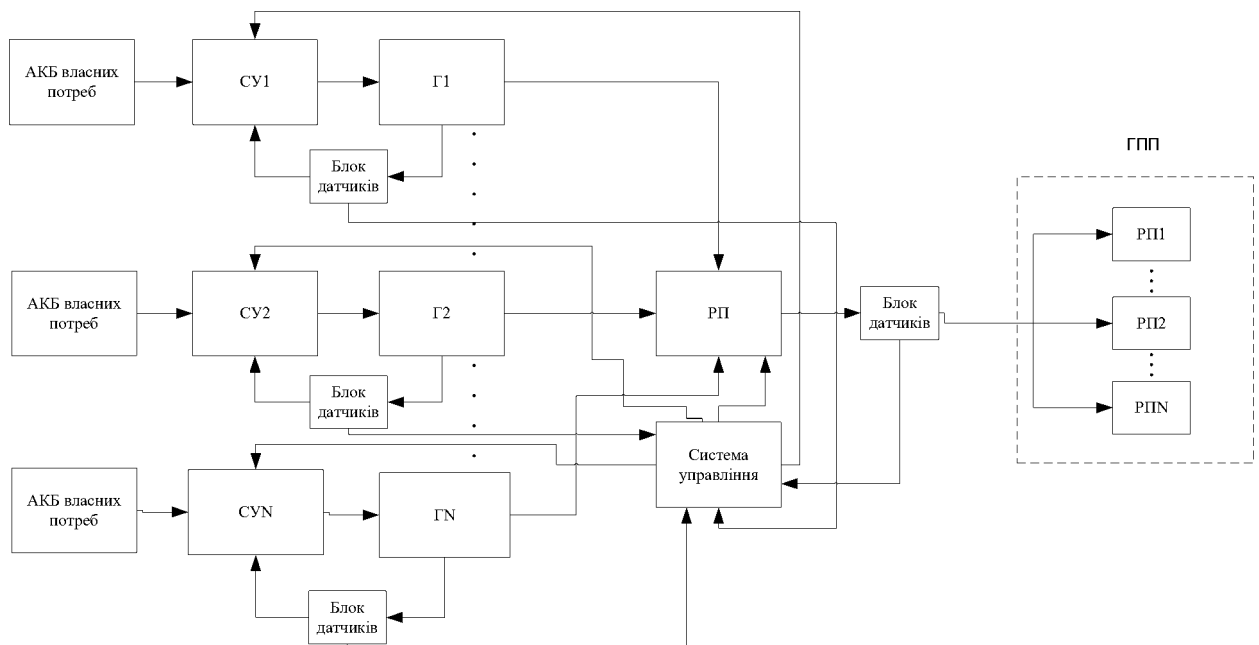


Рисунок 2.1 – Структурна схема ВЕС: АКБ – акумуляторні батареї; СУ – система управління; Г – вітрогенератор; РП – розподільчий пристрій

Основними генеруючими елементами станції є вітрогенератори Г1, Г2 ... ГN. Кожен із них перетворює механічну енергію вітрового потоку в ЕЕ та працює як окремий функціональний модуль у складі загальної ВЕС. Така структура

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.02		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Походай С.С.					
Перевірів		Дозсренко О.В.					
Н. Контр.		Дозсренко О.В.					
Затвердж.		Пересунько І.І.					
					Літ.		
					Арк.		
					Акрушів		
					32		
					19		
					КНУ		
					гр. ЗЕЕМ-23ск		

дозволяє нарощувати потужність станції за модульним принципом, а також забезпечувати роботу окремих вітрогенераторів незалежно один від одного. Це важливо для гірничорудних підприємств, де електричне навантаження може бути розосередженим, змінним і залежним від технологічного режиму роботи кар'єру.

Кожна ВЕУ має власну систему управління СУ1, СУ2 ... СУN. Локальні системи управління забезпечують пуск, зупинку, контроль режиму роботи генератора, підтримання допустимих значень напруги і частоти, а також захист обладнання у разі виникнення аварійних або передаварійних режимів. До складу кожної установки також входить блок датчиків, який здійснює вимірювання основних параметрів: швидкості вітру, частоти обертання, напруги, струму, потужності, температури окремих вузлів та інших діагностичних показників. Отримана інформація передається як до локальної системи управління, так і до центральної системи керування ВЕС.

Акумуляторні батареї власних потреб призначені для живлення систем автоматики, контролю, захисту, зв'язку та допоміжних кіл окремих ВЕУ. Їх наявність підвищує надійність роботи станції, оскільки навіть у разі зниження генерації або короткочасного зникнення напруги зберігається можливість роботи систем керування і контролю.

ЕЕ від вітрогенераторів надходить до розподільчого пристрою РП, через який здійснюється об'єднання генеруючих модулів та подальша передача ЕЕ до внутрішньої мережі підприємства або до головної понижувальної підстанції ГПП. Через РП1, РП2 ... РПN може виконуватися живлення окремих груп споживачів, технологічних ділянок або локальних енергетичних вузлів.

Центральна система управління виконує координуючу функцію. Вона аналізує дані від блоків датчиків, контролює стан усіх ВЕУ, визначає доцільність підключення або відключення окремих генераторів, забезпечує узгодження роботи станції з внутрішньою мережею підприємства та формує керуючі впливи для підтримання стійкого режиму роботи ВЕС. Саме на цьому рівні доцільно реалізовувати інтелектуальні алгоритми, зокрема Fuzzy-керування, оскільки

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.02	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

робота ВЕС відбувається в умовах змінної швидкості вітру, несталого навантаження та необхідності оперативного вибору оптимального режиму.

2.2 Визначення вхідних і вихідних змінних системи Fuzzy-керування

Сучасні системи керування ВЕУ спрямовані на забезпечення ефективного перетворення енергії вітрового потоку в ЕЕ, стабілізацію вихідних параметрів генератора та підтримання допустимих режимів роботи обладнання. Для ВЕУ з нерегульованою або обмежено регульованою швидкістю обертання важливим завданням є забезпечення відбору максимально можливої потужності від вітроколеса шляхом керованої зміни електричного навантаження генератора, параметрів збудження, підключення додаткових конденсаторних батарей або баластного навантаження [18].

Разом з тим робота ВЕУ відбувається в умовах значної невизначеності. Швидкість вітру має випадковий, поривчастий характер, а тому механічна потужність, що надходить на вал генератора, постійно змінюється. Крім того, електричне навантаження споживачів також може бути несталим, особливо в умовах промислових підприємств, де частина обладнання працює періодично або з різко змінними режимами. Унаслідок цього ВЕУ як об'єкт автоматичного керування є нелінійною та нестаціонарною системою, що перебуває під впливом динамічних вітрових і електричних збурень.

За таких умов традиційні закони керування не завжди забезпечують достатню якість регулювання [28]. Жорсткі порогові алгоритми можуть призводити до частих комутацій, запізнення керувальних дій або надмірного підключення компенсуючих елементів. Тому доцільним є доповнення системи керування елементами нечіткої логіки. Використання Fuzzy-регулятора дозволяє формувати керувальні дії не лише за точними числовими значеннями параметрів, а й за їх лінгвістичними оцінками: «нижче норми», «норма», «вище норми», «мале відхилення», «значне відхилення» тощо. Це дає змогу враховувати невизначеність режимів роботи ВЕУ та реалізувати більш гнучке керування.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.02	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У межах даної системи нечітке керування доцільно застосовувати для формування сигналів керування симісторними ключами, які здійснюють комутацію робочих конденсаторних батарей і баластного навантаження [28]. Робочі конденсаторні батареї використовуються для підтримання необхідного рівня напруги та частоти у випадках, коли ці параметри мають тенденцію до зниження відносно номінальних значень. Баластне навантаження, навпаки, доцільно підключати за умов надлишкової генерації, коли напруга або частота перевищують допустимі межі. Таким чином, конденсаторні батареї та баластне навантаження виконують різні функції стабілізації режиму роботи ВЕУ.

На вхід нечіткого регулятора пропонується подавати такі сигнали:

- відносне значення напруги генератора у частках номінальної напруги;
- відносне значення частоти напруги генератора у частках номінальної частоти;
- відносне значення відношення напруги генератора до напруги споживача;
- відносне значення відношення частоти напруги генератора до частоти напруги споживача.

Використання саме відносних значень є зручним, оскільки дозволяє уніфікувати математичну модель для різних номінальних параметрів генератора та споживача. При цьому значення, близькі до одиниці, відповідають нормальному режиму роботи, значення менші за одиницю вказують на зниження параметра, а значення більші за одиницю – на його перевищення.

Вихідним сигналом нечіткого регулятора є сигнал керування симісторними ключами, тобто напруга або керувальний імпульс відпирання симісторів. Саме цей сигнал визначає ступінь або момент підключення відповідної групи конденсаторних батарей чи баластного навантаження. Завдяки цьому система може не просто реагувати на факт відхилення параметра, а формувати більш плавну та обґрунтовану дію залежно від величини відхилення.

Для робочих конденсаторних батарей і баластного навантаження доцільно формувати два окремі комплекти правил нечіткого логічного висновку [27, 29].

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.02	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це пояснюється різною фізичною роллю цих елементів у системі керування. Конденсаторні батареї застосовуються переважно тоді, коли напруга та частота є меншими за номінальні або мають тенденцію до зменшення. Баластне навантаження, навпаки, підключається у випадках, коли напруга та частота перевищують номінальний рівень або коли виникає надлишок генерованої потужності. Тому однакова база правил для цих двох каналів керування була б некоректною.

Наступним етапом створення нечіткої математичної моделі є фазифікація вхідних величин. На цьому етапі точні числові значення вхідних параметрів X перетворюються на нечіткі змінні відповідно до заданих термів. Наприклад, для напруги можуть використовуватися терми «мінімальна», «мала», «нормальна», «висока», «максимальна». У результаті кожному значенню параметра ставиться у відповідність певний ступінь належності до відповідної нечіткої множини.

Для функціонування математичної моделі нечіткого логічного висновку необхідно сформувати експертну базу знань, яка містить лінгвістичні правила залежності вихідної величини від вхідних параметрів [28]:

$$Y=f(X).$$

У загальному вигляді такі правила можуть бути подані у формі [28]:

$$\text{Якщо } X_1=A_1 \text{ і } X_2=A_2 \text{ і } X_3=A_3 \text{ і } X_4=A_4, \text{ то } Y=D,$$

де X_1, X_2, X_3, X_4 – вхідні змінні нечіткого регулятора; A_1, A_2, A_3, A_4 – відповідні лінгвістичні терми; Y – вихідна керувальна дія; D – терм вихідної змінної, що визначає інтенсивність керування симісторними ключами.

Таким чином, формування правил нечіткої логіки є ключовим етапом побудови системи керування ВЕУ. Саме база правил визначає, як система реагуватиме на зміну напруги, частоти та співвідношення параметрів генератора і споживача. Використання окремих правил для конденсаторних батарей і баластного навантаження дозволяє забезпечити більш адекватну стабілізацію параметрів ВЕУ, зменшити кількість різких комутацій та підвищити якість електропостачання споживачів у складі ВЕС.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.02	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Блок нечіткого логічного висновку про значення напруги завдання можна представити у вигляді структури, зображеної на рис. 2.2.

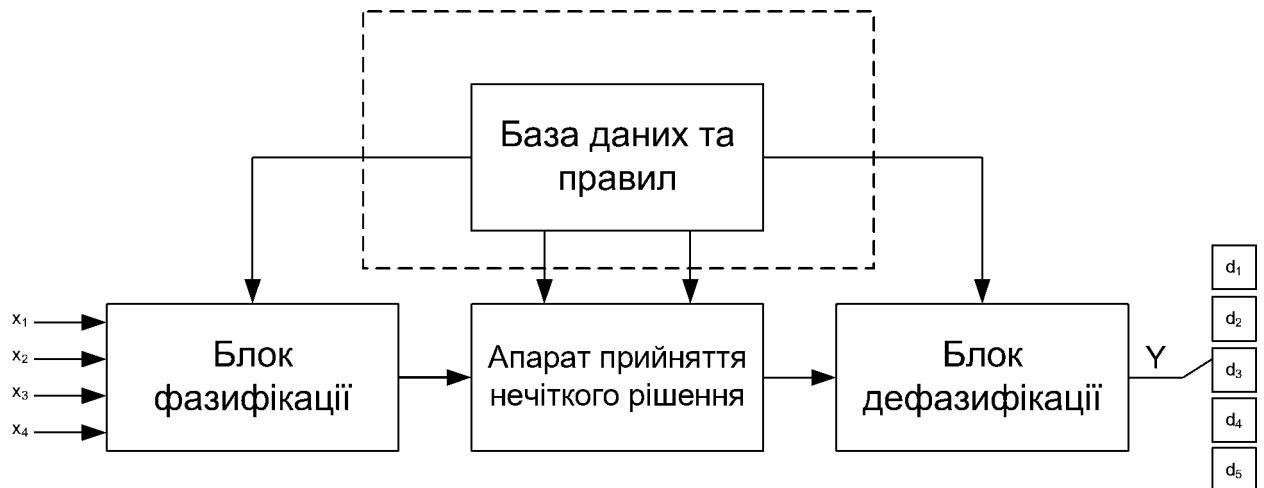


Рисунок 2.2 – Структурна схема блоку нечіткого логічного висновку системи керування ВЕУ з нечітким висновком про зміну струму збудження

У даному випадку доцільно обрати симістори ТС-122, максимальна напруга відпирання яких 3 В, номінальна – 1,5 В.

Далі визначено діапазони зміни входних і вихідних параметрів та виконано їх лінгвістичне оцінювання відповідно до термів, наведених у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристика входних і вихідних параметрів математичної моделі нечіткого висновку щодо напруги керування симісторними ключами

Пара-метри	Назва	Діапазон значень		Терми
X ₁	Відносне значення напруги генератора у частках номінальної напруги	Для БДК	Для БН	Мінімальна (Min), Дуже мала (DM), Мала(М), Невисока(NV), Нормально мала(NM); Максимальна(Мах), Дуже Висока (DV), Висока(V), Вище норми(VN), Нормально висока (NV)
		0,9... 0,95U _н	1,05... 1,1U _н	
X ₂	Відносне значення частоти напруги генератора у частках номінальної частоти	Для БДК	Для ББН	Мінімальна (Min), Дуже мала (DM), Мала(М), Невисока(NV), Нормально мала(NM); Максимальна(Мах), Дуже Висока (DV), Висока(V), Вище норми(VN), Нормально висока (NV)
		0,992... 0,996f _н	1,004... 1,008f _н	

X_3	Відносне значення відношення напруги генератора до напруги споживання	Для БДК	Для БН	Мінімальна (Min), Дуже мала (DM), Мала(M), Невисока(NV), Нормально мала(NM); Максимальна(Max), Дуже Висока (DV), Висока(V), Вище норми(VN), Нормально висока (NV)
		$0,9 \dots 1U_n$	$1 \dots 1,1U_n$	
X_4	Відносне значення відношення частоти напруги генератора до частоти напруги споживання	Для БДК	Для БН	Мінімальна (Min), Дуже мала (DM), Мала(M), Невисока(NV), Нормально мала(NM); Максимальна(Max), Дуже Висока (DV), Висока(V), Вище норми(VN), Нормально висока (NV)
		$0,992 \dots 1f_n$	$1 \dots 1,008f_n$	
Y	Значення напруги завдання симісторних ключів у частках номінальної напруги завдання	Для БДК	Для БН	Мінімальна (Min), Дуже мала (DM), Мала(M), Невисока(NV), Нормально мала(NM); Максимальна(Max), Дуже Висока (DV), Висока(V), Вище норми(VN), Нормально висока (NV)
		$0,4 \dots 1U_n$	$1 \dots 2U_n$	

2.3 Формування бази нечітких правил для керування батареями додаткових конденсаторів та баластним навантаженням

Наступним етапом побудови системи Fuzzy-керування БЕУ є формування бази нечітких правил. Саме база правил визначає логіку роботи регулятора, тобто встановлює відповідність між поточним станом електричних параметрів генератора і необхідною керувальною дією на виконавчі елементи. У даній системі такими виконавчими елементами є симісторні ключі, які здійснюють комутацію батареї додаткових конденсаторів та баластного навантаження.

Принцип формування бази нечітких правил ґрунтується на оцінюванні відхилення основних параметрів БЕУ від номінальних або допустимих значень [27, 29]. До входніх змінних нечіткого регулятора належать: відносне значення напруги генератора X_1 , відносне значення частоти напруги генератора X_2 , відносне значення відношення напруги генератора до напруги споживача X_3 , а також відносне значення відношення частоти напруги генератора до частоти напруги

споживача X_4 . Вихідною змінною Y є значення напруги завдання для симісторних ключів, яке визначає інтенсивність або доцільність підключення відповідного регулювального елемента.

У загальному вигляді база знань нечіткого регулятора може бути представлена у вигляді сукупності правил типу [28]:

$$(X_1 = \tilde{a}_{1j}) \Theta_j (X_2 = \tilde{a}_{2j}) \Theta_j \dots (X_n = \tilde{a}_{nj}) \Rightarrow Y = d_j, j = 1, \dots, m,$$

де $\tilde{a}_{ij}$ – нечіткий терм, яким оцінюється змінна X_i в j -тому правилі; Θ_j – логічна операція, що пов’язує умови правила; d_j – терм вихідної змінної; m – кількість правил в базі.

Для розглянутої системи нечіткого керування доцільно використовувати два окремі набори правил: один – для батареї додаткових конденсаторів, другий – для баластного навантаження. Це пояснюється тим, що зазначені елементи виконують протилежні функції у системі стабілізації параметрів ВЕУ.

Батарея додаткових конденсаторів застосовується переважно тоді, коли напруга або частота генератора зменшуються відносно номінального рівня. У такому режимі виникає потреба у додатковій компенсації реактивної потужності та підтриманні умов збудження генератора. Тому правила для БДК мають бути орієнтовані на ситуації, коли вхідні змінні мають лінгвістичні оцінки типу **Min**, **DM**, **M**, **NV**, **NM**, тобто відповідають заниженим або наближеним до нижньої межі значенням. Чим більшим є зниження напруги та частоти, тим інтенсивнішою має бути керувальна дія, спрямована на підключення додаткової ємності.

Логіка роботи БДК може бути описана так: якщо напруга генератора є мінімальною або дуже малою, частота також знижена, а відношення параметрів генератора до параметрів споживача свідчить про недостатній рівень ЕЕ на виході, то вихідний сигнал регулятора повинен мати максимальне або підвищене значення. Це забезпечує підключення необхідної кількості конденсаторних секцій. Якщо ж параметри наближаються до нормального рівня, керувальний сигнал зменшується, що запобігає надлишковій компенсації та перенапруженню.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.02	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для баластного навантаження формується інша база правил. Баластне навантаження необхідне у випадках, коли генерована потужність перевищує поточне споживання або коли напруга і частота мають тенденцію до підвищення. Така ситуація може виникати при поривчастому вітрі, різкому зменшенні навантаження споживачів або недостатній здатності системи прийняти всю згенеровану потужність. У цьому випадку баластне навантаження виконує функцію керованого споживача, який приймає надлишкову енергію та обмежує зростання вихідних параметрів генератора.

Правила для БН орієнтовані на лінгвістичні терми **Max**, **DV**, **V**, **VN**, **NV**, тобто на підвищені значення напруги, частоти та їх відношень. Якщо напруга генератора є максимальною, частота перевищує номінальну, а співвідношення параметрів генератора і споживача свідчить про надлишковий режим, то Fuzzy-регулятор повинен сформувати сигнал на підключення баластного навантаження. У міру зменшення відхилень від номінального рівня інтенсивність цього сигналу має знижуватися.

Використання різних наборів правил для БДК і БН є принципово необхідним, оскільки ці елементи працюють у різних режимних зонах. БДК активізується переважно у зоні знижених параметрів і спрямована на підвищення або стабілізацію напруги та частоти. БН, навпаки, активізується у зоні підвищених параметрів і призначене для відведення надлишкової потужності. Якщо застосовувати одну універсальну базу правил для обох каналів, регулятор може формувати суперечливі керувальні дії: одночасно прагнути підвищити напругу за допомогою конденсаторів і знизити її через підключення баласту. Тому розділення баз правил підвищує фізичну коректність і стійкість роботи системи керування.

З урахуванням наведеного підходу сформовано базу знань нечітких правил для батареї додаткових конденсаторів та базу знань нечітких правил для баластного навантаження, які наведено відповідно в табл. 2.2 та 2.3.

Таблиця 2.2 – База знань нечітких правил для БДК

Входи					Вихід
					КНУ.РБ.141.26.251с-13.02
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y
Min	Min	Min	Min	Max
Min	Min	DM	Min	
Min	DM	Min	Min	
DM	DM	Min	Min	
Min	Min	Min	DM	
Min	Min	DM	DM	
Min	DM	DM	DM	
DM	DM	DM	DM	DV
DM	DM	DM	M	
DM	DM	M	M	
DM	M	M	M	
M	DM	M	M	
M	M	M	NV	V
M	M	NV	NV	
M	NV	NV	NV	
NV	NV	NV	NV	NV
M	M	M	NV	
M	M	NV	NV	
M	NV	NV	NV	
NV	NV	NV	NM	
NV	NV	NM	NM	VN
NV	NM	NM	NM	
NM	NM	NM	NM	

Таблиця 2.3 – База знань нечітких правил для ББН

Входи				Вихід Y
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
Max	Max	Max	Max	NM
Max	Max	DV	Max	
Max	DV	Max	Max	
DV	DV	Max	Max	
Max	Max	Max	DV	
Max	Max	DV	DV	
Max	DV	DV	DV	

DV	DV	DV	DV	NV
DV	DV	DV	V	
DV	DV	V	V	
DV	V	V	V	
V	DV	V	V	
V	V	V	V	M
V	V	VN	VN	
V	VN	VN	VN	
VN	VN	VN	VN	DM
V	V	V	VN	
V	V	VN	VN	
V	VN	VN	VN	
VN	VN	VN	NV	
VN	VN	VN	NV	Min
VN	NV	NV	NV	
NV	NV	NV	NV	

При зниженні напруги або частоти система нечіткого керування аналізує ступінь відхилення кожної вхідної змінної. Якщо зниження незначне, регулятор може сформувати малий або середній керувальний вплив. Якщо ж зниження параметрів є суттєвим і одночасно спостерігається невідповідність між параметрами генератора та споживача, вихідний сигнал для БДК збільшується. Такий підхід дозволяє не тільки підтримати напругу і частоту, а й уникнути різкого підключення всієї ємності одразу.

При підвищенні напруги або частоти активізується логіка керування баластним навантаженням. У цьому випадку регулятор оцінює, наскільки параметри перевищують допустимий або номінальний рівень. Якщо перевищення невелике, баласт може підключатися частково або з мінімальним керувальним сигналом. Якщо ж напруга і частота досягають високих або максимальних значень, вихідний сигнал для БН збільшується, що забезпечує відведення надлишкової енергії та запобігає переходу ВЕУ в аварійний режим.

Після формування правил і виконання операції нечіткого висновку отримується нечітка множина вихідної змінної $\tilde{Y}$ [28]. Для переходу до конкретного числового значення керувального сигналу виконується

дефазифікація. У даній моделі доцільним є використання методу центра ваги, оскільки він забезпечує плавну зміну вихідної величини та дозволяє уникати різких стрибків керувального сигналу. У результаті на виході Fuzzy-регулятора формується конкретне значення напруги завдання для симісторних ключів, яке визначає режим підключення батареї додаткових конденсаторів або баластного навантаження.

Таким чином, база нечітких правил є основним елементом інтелектуальної системи керування ВЕУ. Вона забезпечує перехід від виміряних електричних параметрів до керувальних дій, що мають фізичний зміст і відповідають реальному режиму роботи установки. Окреме формування правил для БДК і БН дозволяє врахувати різну спрямованість їх дії, підвищити плавність регулювання, зменшити кількість різких комутацій та забезпечити стабілізацію вихідних параметрів ВЕУ в умовах змінної швидкості вітру і несталого навантаження.

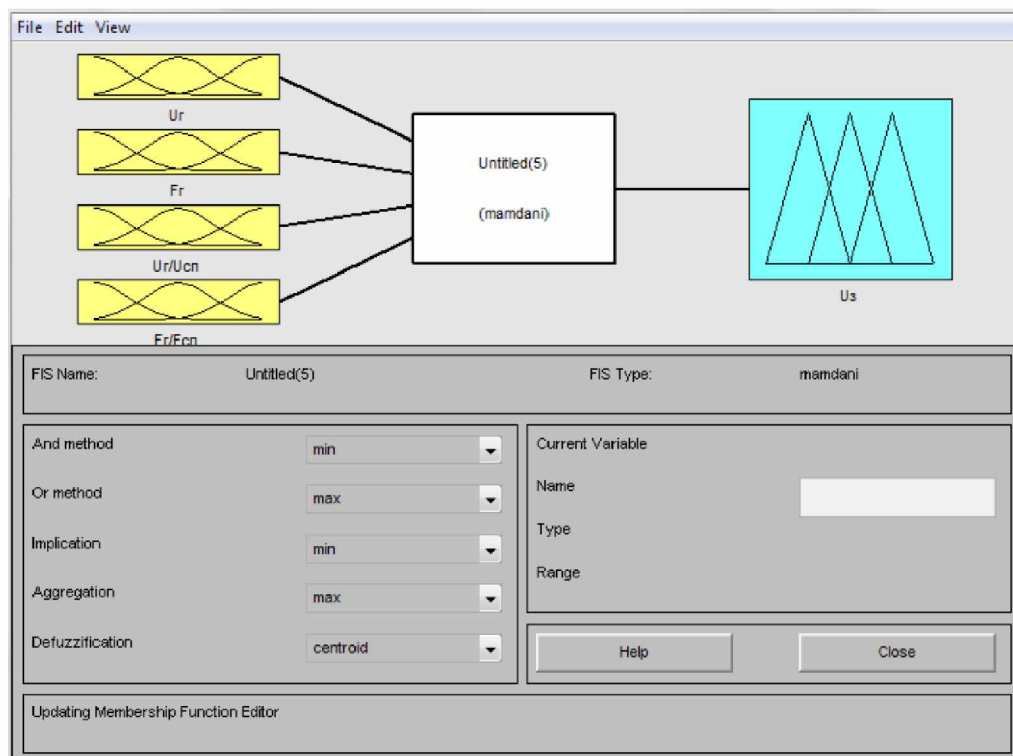


Рисунок 2.3 – Діалогове вікно формування бази нечітких правил

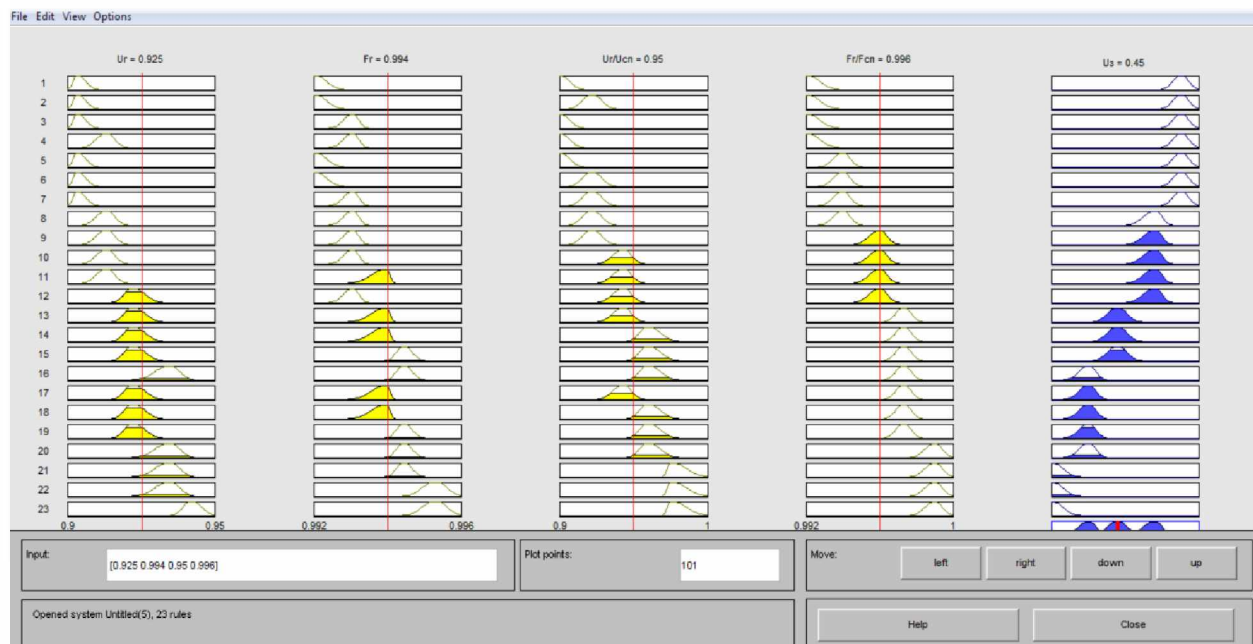


Рисунок 2.4 – Діалогове вікно бази правил

2.4 Побудова Fuzzy-моделі системи керування вітроенергетичною станцією

Моделювання системи Fuzzy-керування БЕУ виконано у середовищі Matlab із використанням інструментів нечіткого логічного висновку. На цьому етапі було задано вхідні та вихідні змінні регулятора, визначено діапазони їх зміни, сформовано функції належності для лінгвістичних термів, а також реалізовано базу нечітких правил для керування симісторними ключами батареї додаткових конденсаторів і баластного навантаження.

На рис. 2.5 наведено приклад налаштування функцій належності для вхідної змінної, що характеризує відносне значення напруги генератора. Для цієї змінної використано декілька лінгвістичних термів, які відображають ступінь відхилення напруги від номінального значення. Такий підхід дозволяє регулятору не обмежуватися жорстким пороговим рішенням, а враховувати плавний перехід між режимами «мінімальна», «дуже мала», «мала», «невисока» та «нормально мала».

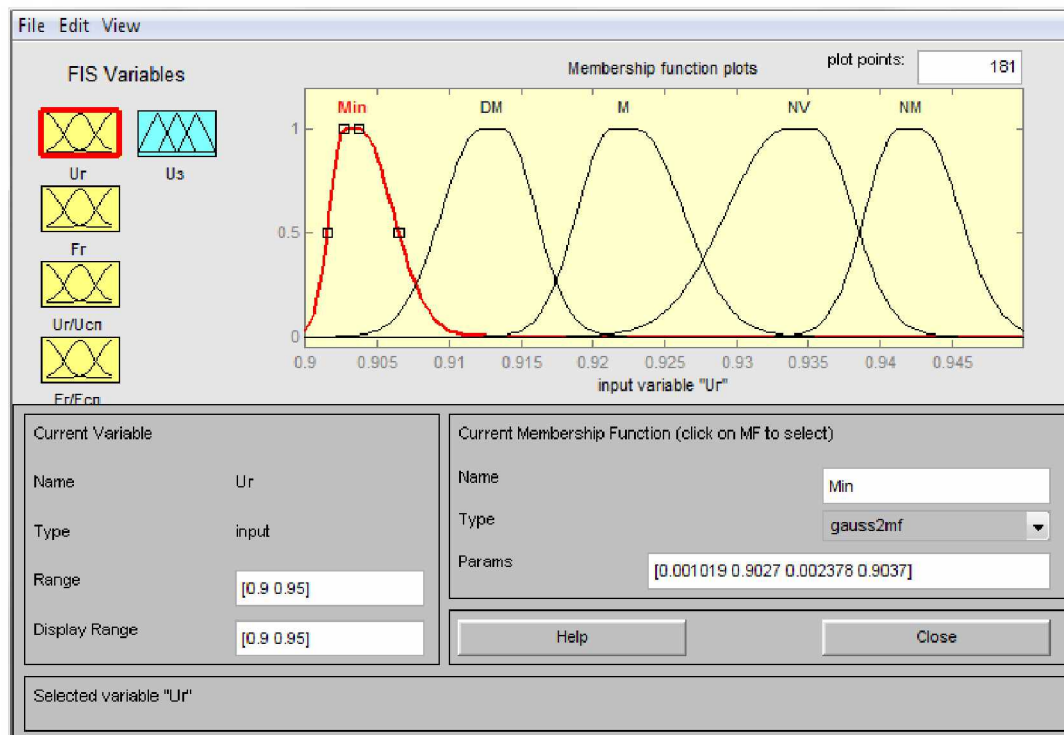


Рисунок 2.5 – Налаштування функцій належності вхідної змінної напруги генератора в середовищі Matlab

На рис. 2.6 показано формування функцій належності для вихідної змінної, яка відповідає напрузі завдання симісторних ключів. Саме ця змінна визначає інтенсивність керувального впливу на виконавчі елементи системи. Для вихідної змінної задано набір термів, що дозволяють формувати як слабкий, так і більш інтенсивний сигнал керування залежно від комбінації вхідних параметрів.

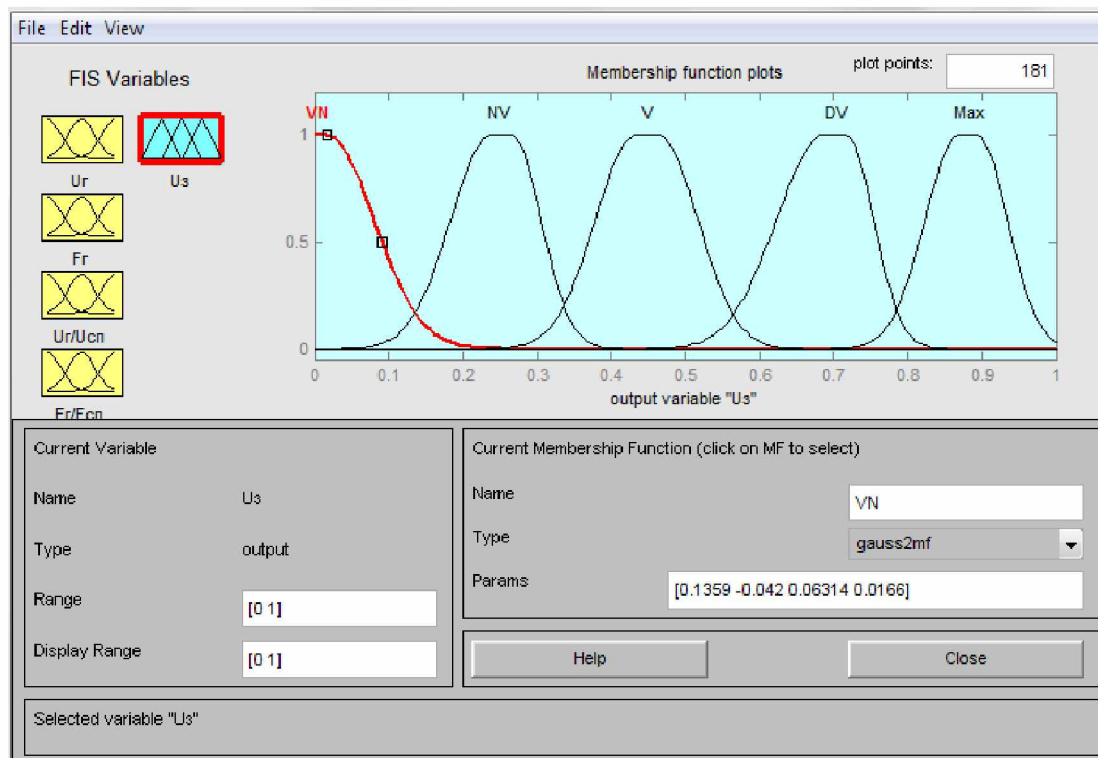


Рисунок 2.6 – Налаштування функцій належності вихідної змінної Fuzzy-регулятора

На рисунку 2.7 наведено фрагмент вікна редагування бази правил. У цьому вікні задаються умови типу IF–THEN, які пов’язують лінгвістичні значення входних змінних із відповідною вихідною дією. Кожне правило визначає, якою має бути напруга завдання симісторних ключів за певного поєднання напруги генератора, частоти, відношення напруги генератора до напруги споживача та відношення частот. Таким чином, база правил реалізує логіку керування БДК і БН, сформовану в минулому підрозділі.

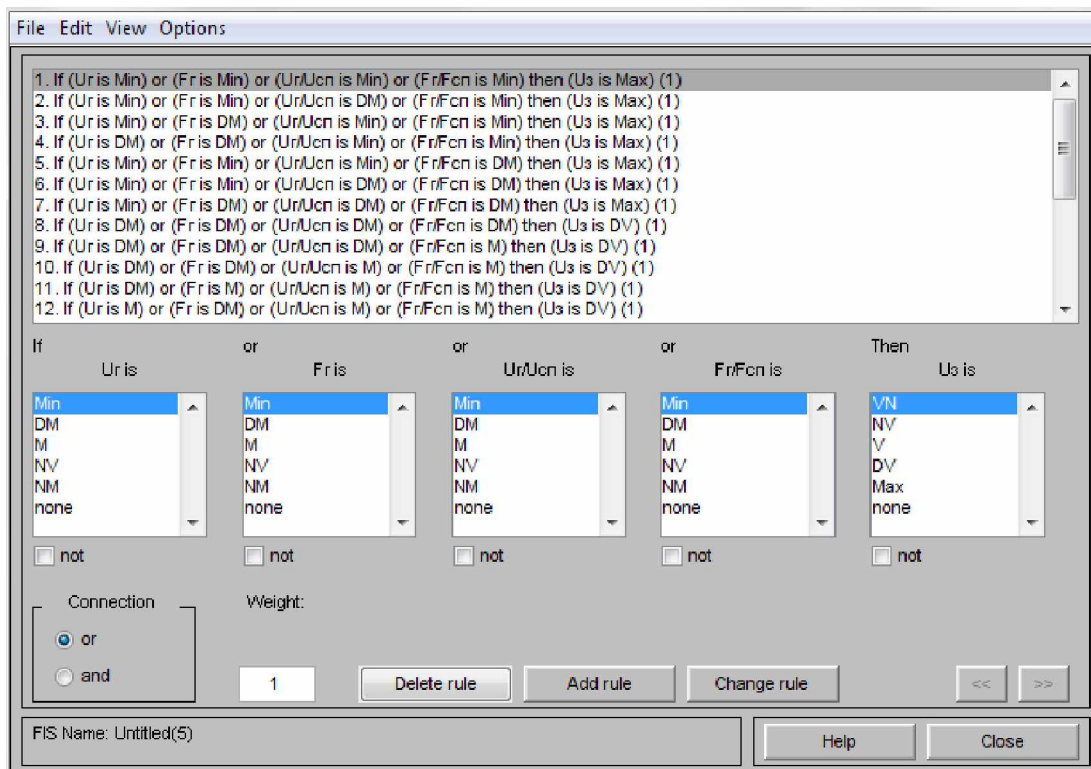


Рисунок 2.7 – Діалогове вікно редагування бази правил Fuzzy-регулятора

Подані на рис. 2.5–2.7 елементи Fuzzy-моделі відображають послідовність налаштування нечіткого регулятора в середовищі Matlab. На першому етапі визначаються вхідні та вихідні змінні, після чого для кожної з них формуються функції належності, які забезпечують перехід від числових значень параметрів до відповідних лінгвістичних термів. Далі на основі сформованих термів задається база правил, що встановлює відповідність між поточним станом напруги, частоти, співвідношенням параметрів генератора і споживача та вихідною керувальною дією. Таким чином, побудована модель дозволяє перейти від вимірних електричних параметрів ВЕУ до формування напруги завдання для симісторних ключів.

Після налаштування функцій належності та бази правил Fuzzy-регулятор може бути використаний для дослідження залежності вихідного керувального сигналу від зміни вхідних параметрів. Результати такого моделювання наведено у наступному підрозділі..

2.5 Аналіз результатів моделювання Fuzzy-керування вітроенергетичною станцією

Під час побудови поверхонь керування на рис. 2.8 та 2.9 як змінні параметри прийнято відносне значення напруги генератора U_g та відносне значення частоти F_g , тоді як інші вхідні змінні враховуються через сформовану базу нечітких правил або приймаються фіксованими для відповідного режиму моделювання

На рисунку 2.8 наведено поверхню залежності напруги завдання для блоку додаткових конденсаторів від вхідних параметрів Fuzzy-регулятора. Отримана залежність показує, що керувальний сигнал змінюється плавно залежно від відхилення напруги, частоти та співвідношення параметрів генератора і споживача. Для зони знижених значень напруги та частоти регулятор формує більший керувальний вплив, що відповідає необхідності підключення додаткової ємності. Це дозволяє підтримати умови збудження генератора та стабілізувати вихідні параметри БЕУ.

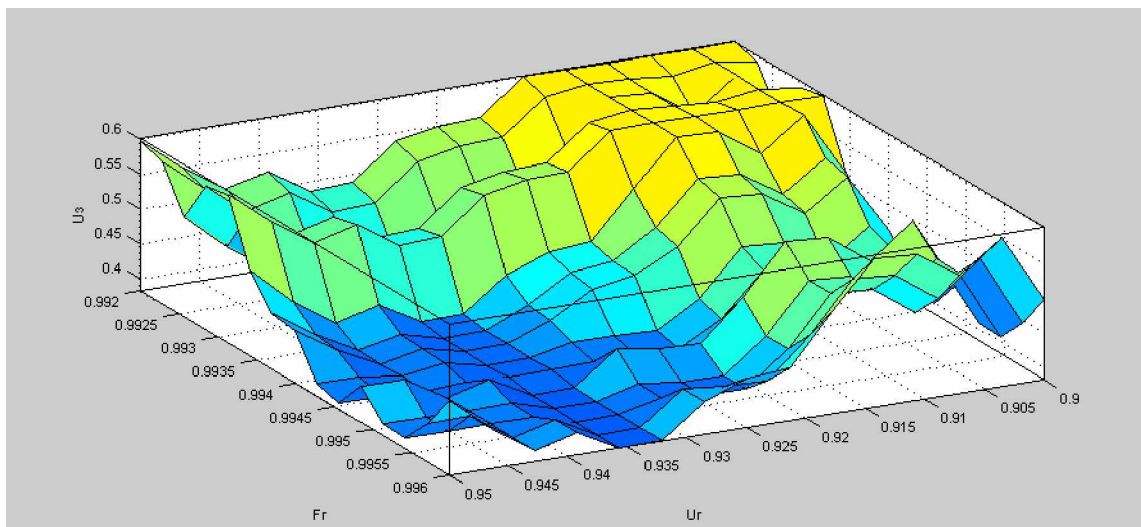


Рисунок 2.8 – Залежність напруги завдання для блоку додаткових конденсаторів від параметрів генератора та споживача

На рисунку 2.9 наведено залежність напруги завдання для блоку баластного навантаження. На відміну від БДК, цей канал керування активізується у зоні підвищених значень напруги та частоти. У разі зростання параметрів генератора понад номінальний рівень Fuzzy-регулятор збільшує

вихідний сигнал, що відповідає підключенню баластного навантаження. Це забезпечує відведення надлишкової енергії, обмеження зростання напруги і частоти та запобігання переходу ВЕУ в аварійний режим.

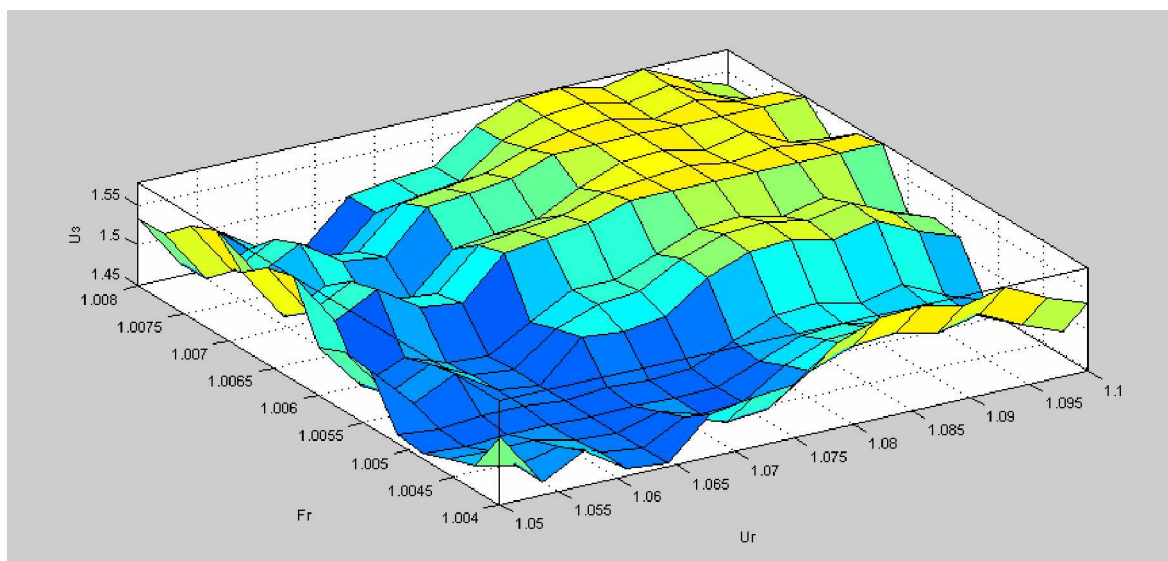


Рисунок 2.9 – Залежність напруги завдання для блоку баластного навантаження від параметрів генератора та споживача

Аналіз поверхонь, наведених на рис. 2.8 та 2.9, показує, що Fuzzy-регулятор формує керувальний сигнал з урахуванням ступеня відхилення вхідних параметрів від номінальних значень. Для блоку додаткових конденсаторів збільшення вихідного сигналу відповідає режимам, у яких напруга або частота мають тенденцію до зниження, що потребує підключення додаткової ємності. Для блоку баластного навантаження керувальний сигнал зростає у зоні підвищених значень параметрів, коли необхідно відвести надлишкову енергію та обмежити зростання напруги або частоти.

Отримані графіки підтверджують, що зміна вихідного керувального сигналу має плавний характер. Це є важливою перевагою Fuzzy-керування порівняно з простими пороговими алгоритмами, оскільки система реагує не стрибкоподібно, а відповідно до величини відхилення параметрів. У результаті зменшується кількість різких комутацій симісторних ключів, підвищується

стійкість роботи генератора та покращується якість електропостачання споживачів.

Отримані результати моделювання підтверджують доцільність використання Fuzzy-керування у складі ВЕС для умов гірничорудного підприємства. Запропонована система може застосовуватися для живлення віддалених або локальних споживачів, зокрема систем освітлення, моніторингу, зв'язку, диспетчеризації, насосних установок малої та середньої потужності, а також допоміжних електроприймачів кар'єру.

Основна перевага запропонованого підходу полягає у здатності системи керування адаптуватися до змін швидкості вітру та навантаження без необхідності побудови точного математичного опису всіх процесів. Fuzzy-регулятор дозволяє формувати керувальні дії на основі лінгвістичних правил, що є зручним для об'єктів із невизначеними та нелінійними режимами роботи.

Використання окремих каналів керування для батареї додаткових конденсаторів і баластного навантаження дозволяє стабілізувати напругу та частоту як у режимах зниження, так і у режимах підвищення вихідних параметрів генератора. Це створює передумови для підвищення надійності роботи ВЕС, зменшення навантаження на зовнішню мережу підприємства та більш ефективного використання вітрового потенціалу території ГЗК.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.02	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто питання розробки та моделювання системи управління ВЕС на базі Fuzzy-логіки для умов гірничорудних підприємств. Обґрунтовано, що використання ВЕС у системах електропостачання таких підприємств є перспективним напрямом підвищення енергоефективності, часткової енергетичної автономності та надійності живлення віддалених споживачів.

У першому розділі проаналізовано призначення, класифікацію та основні схеми роботи ВЕУ та ВЕС. Розглянуто особливості використання ВЕС на території гірничорудних підприємств, зокрема на відвалах, відкритих промислових майданчиках і периферійних ділянках. Показано, що кар'єри, борти, відвали та промислові споруди впливають на характер вітрового потоку, тому під час вибору місця встановлення ВЕУ необхідно враховувати рельєф, турбулентність, віддаленість від електричних мереж та умови експлуатації.

Розглянуто основні режими роботи ВЕС: автономний, мережевий, комбінований, режим роботи з акумуляторними батареями та без них, а також стартовий, генераторний і аварійний режими. Встановлено, що змінність швидкості вітру, нерівномірність навантаження та потреба у стабілізації напруги й частоти зумовлюють необхідність застосування автоматизованої системи керування. Обґрунтовано доцільність використання Fuzzy-логіки, оскільки вона дозволяє формувати керувальні дії в умовах невизначеності та неповного математичного опису об'єкта.

У другому розділі розроблено структурну схему ВЕС для умов гірничорудного підприємства. Визначено, що ВЕС має включати вітрогенератори, локальні системи управління окремих ВЕУ, блоки датчиків, акумуляторні батареї власних потреб, розподільчі пристрої та центральну

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.В		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Висновки		
Розробив		Походай С.С.					
Перевірів		Доззренко О.В.					
Н. Контр.		Доззренко О.В.					
Затвердж.		Пересунько І.І.			КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск		
					Літ.	Арк.	Акрушів
						51	2

систему управління. Центральна система керування забезпечує координацію роботи окремих ВЕУ, аналіз параметрів режиму, зв'язок із внутрішньою мережею підприємства та формування керувальних впливів.

Визначено вхідні та вихідні змінні системи Fuzzy-керування. До вхідних параметрів віднесено відносне значення напруги генератора, відносне значення частоти, відношення напруги генератора до напруги споживача та відношення частоти генератора до частоти споживача. Вихідною змінною є напруга завдання симісторних ключів, яка визначає керувальний вплив на батарею додаткових конденсаторів або баластне навантаження.

Сформовано базу нечітких правил для керування батареєю додаткових конденсаторів і баластним навантаженням. Показано, що для цих двох каналів необхідно використовувати різні набори правил, оскільки БДК працює переважно у зоні знижених значень напруги та частоти, а баластне навантаження – у зоні підвищених параметрів. Такий підхід дозволяє уникнути суперечливих керувальних дій і забезпечити коректну реакцію системи на зміну режиму роботи ВЕУ.

Побудовано Fuzzy-модель системи керування ВЕС у середовищі Matlab. У моделі задано функції належності для вхідних і вихідної змінних, реалізовано базу нечітких правил та виконано моделювання залежностей напруги завдання для блоку додаткових конденсаторів і блоку баластного навантаження. Отримані результати показали, що вихідний керувальний сигнал змінюється плавно залежно від зміни вхідних параметрів.

У результаті виконаної роботи підтверджено доцільність застосування Fuzzy-логіки у системі управління ВЕС для умов гірничорудних підприємств. Запропонована система дозволяє підвищити стабільність роботи ВЕУ, зменшити кількість різких комутацій симісторних ключів, забезпечити більш плавне керування конденсаторними батареями та баластним навантаженням, а також створити передумови для покращення якості електропостачання локальних споживачів підприємства.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.В	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізорудних підприємств. (Аналіз, перспективи, проекти): Монографія / Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М., Караманиць Ф. І., Ялова А.М., Пархоменко Р.О.; Кривий Ріг: ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.

[2] І. О. Сінчук, С. М. Бойко, І. В. Касаткіна, О. В. Дозоренко. Аспекти розвитку вітроенергетики в умовах залізорудних підприємств // *Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць.* – Кривий Ріг, 2021. – Вип. 52. – С. 70–76. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-52-70-77>.

[3] І. О. Сінчук., Э. С. Гузов, В. А. Кольсун, В. С. Козлов, С. М. Бойко, та О. Є. Мельник. Енергозбереження на підприємствах гірничовидобувної промисловості. Проблеми, шляхи реалізації: Монографія. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О. В., 2016. – 340 с.

[4] Бойко С. М. Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств : монографія / С. М. Бойко ; за ред. О. М. Сінчука. – Кременчук : Щербатих О. В., 2020. – 260 с.

[5] Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Горенко Д.С. Особливості оцінювання режимів функціонування локальних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами. *Енергетика: економіка, технологія, екологія.* №1, 2020. С.7-20. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2020.217558>.

[6] Михайленко О., Барановський В., Щокін В., Федотов В., Поліщук П. Нечітке керування електроспоживанням електромеханічного обладнання головного водовідливного комплексу залізорудної шахти. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки.* 2024. Т. 331, №1. С. 107-115. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-18>.

					КНУ.РВ.141.26.251с-13.Л					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розробив		Походай С.С.			Список використаних джерел			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Дозсренко О.В.							53	4
Н. Контр.		Дозсренко О.В			КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск					
Затвердж.		Пересунько І.І.								

[7] Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. ISBN 978-966-350-526-8.

[8] Бойко С.М., Сінчук І.О., Жуков О.А., Савицький О.І. Комплексне використання відновлювальних джерел енергії: Підручник. За редакцією доктора технічних наук, професора О.М. Сінчука – Кривий Ріг: ПП Щербатих О.В. – 2021. 204 с.

[9] Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах : монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. – Вінниця : Вінниця : ВНТУ, 2014. – 204 с. ISBN 978-966-641-577-9.

[10] Бойко, С. М. Особливості електропостачання залізрудних підприємств при впровадженні розосередженої генерації / С.М. Бойко, Борисенко, Некрасов, Городній, Касянов // *Технічні науки та технології : науковий журнал / Черніг. нац. технол. ун-т.* – Чернігів : ЧНТУ, 2019. – № 2 (16). – С. 118-128.

[11] Energy-efficient system of power supply of remote consumers of mining and concentration plants: monograph / I. Sinchuk, O. Dozorenko, M. Baranovska, O. Zamytskyi, P. Polishchuk. Warsaw: iScience Sp. z.o.o. 2023. 107 p.

[12] Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с. ISBN 978-966-999-077-8.

[13] Сінчук І. О. Методологічні засади оцінювання електроефективності залізрудних підприємств: монографія, ПП Щербатих. – 2019. 284 с.

[14] Сінчук, О.М. До питання проектування вітроенергетичних станцій в умовах гірничорудних підприємств / О.М. Сінчук, С.М. Бойко, А.В. Некрасов, М.О. Ножнова, М. М. Федь // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* – 2020 – Том 31 (70) № 3. – С. 153-157.

[15] Півняк Г. Г., Білий М. М., Бажін Г. М. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2008. – 550 с.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.Л	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

[16] Електрифікація гірничих робіт: Підручник. - Вид. 2-е, допрац. та доп. / Г. Г. Півняк, М. М. Бєлий, Л. П. Ворохов, В. Т. Заїка, Ю. М. Зражевський, Ю. Т. Разумний, А. Я. Рибалко, В. І. Тесленко, Ф. П. Шкрабець ; За ред. академіка НАН України Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. 615 с.

[17] Берідзе Т.М. Дослідження критеріїв оцінювання якісних показників електропостачання промислових підприємств / Берідзе Т.М., Касаткіна І.В., Бойко С.М. // *Вісник Криворізького національного університету*: зб. наук, праць, Кривий Ріг, вип. 57, 2023. с. 121-127.

[18] Сьомочкин А. Б. До форматизації варіантів керування вітроелектричною установкою / А. Б. Сьомочкин, О. В. Дозоренко // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал*. – Кременчук: КрНУ, 2022. – Вип. 1/2022 (57). – С. 46-54. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.1.57.46-54>.

[19] Сінчук О.М. Аналіз факторів впливу на основні енергетичні характеристики вітроенергетичних станцій, що експлуатуються в умовах гірничорудних підприємств / О.М. Сінчук, С.М. Бойко, А.В. Некрасов, М.О. Ножнова, А.О. Онищенко // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. – 2020 – Том 31 (70) № 2. – С. 256-262.

[20] Сінчук О. М., Бойко С. М., Краснопольський Р. І. До питання формування джерел розосередженої генерації в умовах залізрудних підприємств. *Вісник Криворізького національного університету*, 2020. № 50. С. 41-45.

[21] Патент UA 86427, Спосіб розташування електроенергетичної вітроустановки на відвалах кар'єрів та шахт, Кривоус А. О.; Бойко С. М.; Дяченко В. С.; Сінчук О. М. опубл. 25.12.2013.

[22] І. О. Сінчук, Коментар до стану електроенергетики залізрудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О. В., 2018. – 166 с.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.Л	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[23] Кузнецов М.П. Вплив розташування групи ВЕС на рівномірність їх сумісної роботи / М.П.Кузнецов // *Відновлювана енергетика XXI століття: XIV міжнар. конф.*, 16–20 вересня 2013 р.: тези доп. – АР Крим, 2013. – С. 334–339.

[24] Кузнецов М.П. Методи прогнозування виробітку електроенергії вітровими електростанціями / М.П.Кузнецов // *Відновлювана енергетика*. – 2010. – № 3. – С. 42–48.

[25] Лежнюк П.Д. Розосереджені джерела електроенергії в електричних мережах / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, О.А. Ковальчук, В.О. Хоменко // *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*. – 2011. – № 1. – С. 104–108.

[26] Operating modes of mining enterprises. Condition, problems.: monograph / O. Dozorenko, I. Peresunko, O. Mykhailenko, V. Fedotov, A. Pyrozhenko. Warsaw: iScience Sp. z.o.o. 2023. 114 p.

[27] Farh H. M. H., Eltamaly A. M. Fuzzy Logic Control of Wind Energy Conversion System. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2013. Vol. 5, Issue 2: 023125. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4798739>.

[28] Ross T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2016. 584 p. ISBN 978-1-119-23586-6.

[29] Xu B., Wang D., Zhang X., Zhang P. A Pitch Angle Controller Based on Novel Fuzzy-PI Control for Wind Turbine Load Mitigation. *Energies*. 2020. Vol. 13, Issue 22: 6086. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13226086>.

[30] О. Сінчук, С. Бойко, О. Дозоренко, та В. Демків. Пристрій для електротехнічного комплексу електропостачання підприємства з вітроенергетичними установками: пат. 121291 Україна: Н02J 3/38 (2006.01), Н02J 9/04 (2006.01). № и 2017 06756; заявл. 29.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с.

					КНУ.РБ.141.26.251с-13.Л	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		