

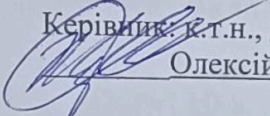
1

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютерні електромеханічні системи і комплекси

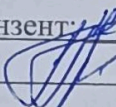
МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
**«Підвищення ефективності системи керування вітровим
електротехнічним комплексом»**


Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕПА-21м
_____ спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка _____
(шифр і назва спеціальності)

_____ Олександр СІЛАГІН _____

Керівник: к.т.н., доц. кафедри КЕМСК
 Олексій ЖУКОВ _____

« 15 » листопада 2022 р.

Рецензент:  Т. К., доц. каф. ЕСЕМ

 Бабенко О. В.

« 19 » грудня 2022 р.

Допущено до захисту

В.о. зав. кафедри КЕМСК


_____ к.т.н., доц. МИКОЛА Моїноріз

«30» листопада 2022 р.

Вінницький національний технічний університет
 Факультет Електроенергетики та електромеханіки
 Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
 Галузь знань 14 – Електрична інженерія
 Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

к.т.н., доц. МИКОЛА Мошноріз

«06» вересня 2022 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сілагіну Олександрю Григоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом

керівник роботи Жуков Олексій Анатолійович к.т.н., доц. каф. КЕМСК.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “14” вересня 2022 р. № 203

2. Строк подання студентом роботи « 30 » листопада 2022 р.

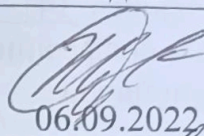
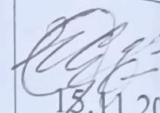
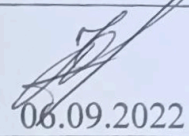
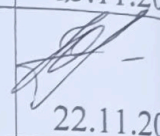


3. Вихідні дані до роботи: режим роботи тривалий, електричний генератор синхронного типу з електричним збудженням, потужність до 3 кВт

4. Зміст текстової частини: Вступ; Огляд літературних джерел за темою дослідження. Аналіз систем автоматичного керування вітровими установками. Розробка математичної моделі і законів керування вітроенергетичною установкою. Адаптація структури системи автоматичного керування до нечітких умов роботи. Мікропроцесорна реалізація системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом. Комп'ютерне моделювання. Економічна частина; Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження; Структурна схема системи автоматичного керування. Структура регулятора системи автоматичного керування ВЕК та закон керування. Структура регулятора системи автоматичного керування із блоком нечіткого логічного висновку. Характеристика вхідних та вихідних величин математичної моделі. Результати моделювання системи автоматичного










керування струмом збудження ВЕК. Структурна схема мікропроцесорного пристрою керування струмом збудження генератора ВЕК. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи.

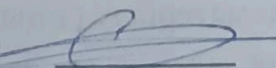
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Жуков О. А., к.т.н., доц. каф. КЕМСК	 06.09.2022	 18.11.2022
Економічна частина	Шулле Ю. А. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	 06.09.2022	 22.11.2022
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Зав. каф. БЖДПБ, д.пед.н., проф. Кобилянський О. В.	 06.09.2022	 29.11.2022

7. Дата видачі завдання 06.09.22

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

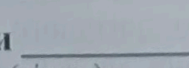
№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	06.09.2022	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	15.11.2022	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	15.11.2022	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	22.11.2022	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	29.11.2022	
6	Попередній захист МКР	30.11.2022	
7	Нормоконтроль МКР	30.11.2022	
8	Рецензування МКР	19.11.2022	
	Захист МКР	20.11.2022	

Студент


(підпис)

ОЛЕКСАНДР СИЛАГІН
(прізвище та ім'я)

Керівник роботи


(підпис)

Олексій ЖУКОВ
(прізвище та ім'я)

АНОТАЦІЯ

УДК: 621.311.24

Сілагін О.Г. Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2022. 120 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 145 назв; рис.: 26; табл. 14.

В магістерській кваліфікаційній роботі були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності функціонування системи керування вітровим електротехнічним комплексом, шляхом створення системи автоматичного керування цим комплексом, що дозволяє збільшити відбір потужності від вітрового колеса. В основній частині роботи запропоновано математичну модель та закон керування вітровою електричною установкою, розроблено структуру системи автоматичного керування, яка реалізує запропонований закон керування, проведено комп'ютерне моделювання вітрового електротехнічного комплексу.

Графічна частина складається з 9 плакатів із результатами роботи.

В розділі охорони праці визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

Ключові слова: вітровий електротехнічний комплекс, генератор вітрової установки, система керування, режими роботи, моделювання, математична модель.

ABSTRACT

Silagin O.G. Increasing the efficiency of the wind power complex control system. Master's thesis in specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, educational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2022. – 120 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 145 titles; fig.: 26; tabl. 14.

In the master's qualification work, solutions were proposed to increase the efficiency of the wind electrotechnical complex control system by creating an automatic control system for this complex, which allows to increase the power extraction from the wind wheel. In the main part of the work, a mathematical model and a control law of a wind power plant are proposed, the structure of an automatic control system that implements the proposed control law is developed, and a computer simulation of a wind power complex is carried out.

The graphic part consists of 9 posters with the results of the work.

In the section of labor protection the basic provisions concerning safe operation of the investigated electrotechnical complex in the conditions of action of harmful factors of environment are defined.

Key words: wind electrical engineering complex, wind turbine generator, control system, operating modes, modeling, mathematical model.

ЗМІСТ

ВСТУП	9	
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ		
ДОСЛІДЖЕННЯ	13	
1.1. Характеристика вітрових коліс ВЕУ.....	13	
1.2. Характеристика структур ВЕУ	14	
1.3. Аналіз безредукторних вітрових електричних установок.....	22	
2 АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ		
ВІТРОВИМИ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ	27	
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ЗАКОНІВ		
КЕРУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ	36	
3.1. Характеристика ВЕУ як об'єкта керування та електротехнічного комплексу.....	36	
3.2. Розробка законів керування, що реалізуються регулятором збудження, та його структури.....	45	
3.3. Синтез регулятора швидкості обертання вітрового колеса з використанням нечіткої логіки	49	
3.4. Застосування генетичних алгоритмів для врахування умов експлуатації ВЕУ	60	
4 АДАПТАЦІЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО		
КЕРУВАННЯ ЗБУДЖЕННЯМ ГЕНЕРАТОРОМ ВЕУ ДО		
СИМБІОЗУ ЧІТКИХ І НЕЧІТКИХ УМОВ		65
5 МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ		
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМ		
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ		68
5.1. Аналіз сенсорів інформативних параметрів регулятора ВЕК.....	69	
6 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ		
СИСТЕМИ	78	

7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	90
8 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	99
ВИСНОВКИ	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	118
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	134
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	139

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АГ – асинхронний генератор

АСГ – асинхронізований синхронний генератор

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

БПЧ – безпосередній перетворювач частоти

ВД – вітровий двигун

ВЕК – вітровий електротехнічний комплекс

ВЕУ – вітрова електрична установка

ВМП – відбір максимальної потужності

ІВМ – інвертор ведений мережею

НВК – над синхронний вентильний каскад

СГ – синхронний генератор

РРТ – power point tracking

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Економічна безпека держави значною мірою залежить стану розвитку енергетики. Вітроенергетика є одним із пріоритетних напрямків розвитку відновлюваних джерел енергії. На даний момент використання енергії вітру стає все більш економічно і стратегічно виправдано, у порівняно з іншими джерелами. Вартість вироблення електроенергії сучасної вітрової електроустановки наближається до вартості електроенергії, отриманої за допомогою традиційних електростанцій [1, 2].

В Україні уже збудовано ряд вітрових електроустановок, які працюють у вузькому діапазоні зміни швидкості вітру, оскільки системи автоматичного керування ними не в змозі забезпечити стабільність частоти струму, що генерується, тобто, ці системи керування не в змозі забезпечити стабільність кутової швидкості обертання вітрових коліс при поривчастому характері вітрового навантаження, оскільки основним способом стабілізації кутової швидкості вітрового колеса ВЕУ є зміна кутів нахилу його лопатей в залежності від потужності вітрового потоку, а такий спосіб є недосконалим, він зменшує коефіцієнт використання вітрової енергії ВЕУ від максимально можливого, ускладнює конструкцію вітрового колеса та суттєво ускладнює систему керування. Тому актуальною є задача розробки такого пристрою та способу керування ВЕУ, який би забезпечував її роботу із жорстко фіксованими лопатями у широкому діапазоні зміни швидкостей вітру, максимально можливий відбір потужності від вітрового електротехнічного комплексу (ВЕК) та прийнятну якість генерованої напруги.

Мета і завдання дослідження. Метою є підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом, шляхом створення системи автоматичного керування цим комплексом, що дозволить збільшити відбір потужності від вітрового колеса.

Для досягнення поставленої мети необхідно **розв'язати такі задачі:**

1. Провести аналіз відомих структур ВЕК та їх систем керування.
2. Запропонувати математичну модель та розробити закон керування ВЕК за критерієм відбору максимуму потужності електроенергії, що генерується.
3. Розробити структуру системи автоматичного керування ВЕК, яка реалізує запропонований закон керування.
4. Розробити комп'ютерну модель вітрового електротехнічного комплексу та визначитися з робочими параметрами автоматичного регулятора струму збудження.
5. Розробити алгоритм функціонування та структуру регулятора системи керування ВЕК для його мікропроцесорної реалізації.

Об'єктом дослідження в магістерській роботі є вітровий електротехнічний комплекс.

Предметом дослідження є процеси регулювання потужності вітрового електротехнічного комплексу.

Методи дослідження: У процесі дослідження застосовувалися: теорія електричних машин; методи аналізу електричних кіл; закони Кірхгофа; методи комп'ютерного імітаційного моделювання для дослідження динаміки електромеханічних систем; методи частотного аналізу стійкості замкнених систем.

Наукова новизна одержаних результатів.

Розроблено закон керування для регулятора струму збудження генератора вітрового електротехнічного комплексу, що забезпечує його роботу у точці максимального відбору потужності вітрового колеса

Практичне значення одержаних результатів.

1. Отримав подальший розвиток підхід до побудови комбінованого регулятора збудження вітрового електротехнічного комплексу, що полягає у поєднанні переваг чіткого і нечіткого законів керування.

2. Розроблено регулятор системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з врахуванням атмосферних впливів, що являє собою комбінований регулятор, який складається з ПІ-регулятора та нечіткого регулятора, які працюють по чергово в залежності від швидкості вітрового потоку, що дозволяє проводити одночасне керування вітровим електротехнічним комплексом в функції напруги та максимуму відбору потужності.

3. Розроблено структурну схему мікропроцесорного засобу та алгоритм його роботи для реалізації функцій регулятора системи автоматичного керування струмом збудження вітрового електротехнічного комплексу на базі контролера з підтримкою Fuzzy Logic, що дозволяє підвищити гнучкість та спростити процес налагодження запропонованої системи.

Особистий внесок здобувача. Основні розрахункові результати з формулюванням відповідних висновків отримані автором самостійно.

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано тези доповідей матеріалів конференцій:

- X Міжнародна науково-практична конференція «EUROPEAN SCIENTIFIC DISCUSSIONS», Рим, Італія, 2021. [Електронний ресурс]. URL: <https://sci-conf.com.ua/x-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-european-scientific-discussions-15-17-avgusta-2021-goda-rim-italiya-arhiv/>

- II Міжнародна науково-практична конференція «Авіація, промисловість, суспільство», 12 травня 2021 року, Кременчук 2021. [Електронний ресурс]. URL:

<https://drive.google.com/file/d/14wswflsnSyYjRuVqp9nSA1hDpDmQgKAX/view>

- VII Міжнародна науково-практична конференція «MODERN RESEARCH IN WORLD SCIENCE», 2-4 жовтня 2022 року, Львів 2022. [Електронний ресурс]. URL:

<https://sci-conf.com.ua/vii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-research-in-world-science-2-4-10-2022-lviv-ukrayina-arhiv/>

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Характеристика вітрових коліс ВЕУ

Знайомство з публікаціями приведеними в списку літератури, дозволяє охопити увесь комплекс питань, що виникають в галузі вітроенергетики, та оцінити досягнуті результати. Із цих публікацій витікає, що ключовими технічними задачами, які потребують розв'язання і передують побудові вітрової електричної установки (ВЕУ) є задача вибору вітрового двигуна та задача вибору електричного генератора, оскільки задача синтезу системи регулювання комплексу «вітровий двигун-електричний генератор» є похідною від перших двох.

Як відомо, у вітрових двигунів є дві основні класифікаційні ознаки: по-перше, у горизонтальній чи у вертикальній площині лежить вісь обертання ротора його вітрового колеса, а по-друге, непорушно прикріплені лопаті вітрового колеса до основи чи у них є можливість повертатись відносно площини його обертання на певний кут.

Як з'ясувалось при ознайомленні з науковими роботами – в сучасному парку вітрових електричних станцій використовуються як вертикально осьові вітростанції так і горизонтально осьові ВЕУ [1, 2], при чому більшість впроваджених в експлуатацію варіантів побудови ВЕУ, мають вітрові двигуни з горизонтальною віссю обертання ротора вітрового колеса. Більше того, значна кількість авторів стверджують, що такий варіант вітрового двигуна має більшу перспективу і уникають можливості використання вітрових двигунів з вертикальною віссю обертання ротора вітрового колеса. Але з цим твердженням, яке, фактично, уже набуло статусу постулату, не можна погоджуватись, виходячи із ряду міркувань, які приведено нижче.

Передача потужності у горизонтальноосьових вітрових електростанціях відбувається від вітроколеса до генератора через редуктор

(мультиплікатор) на генератор. У таких установок є необхідність орієнтації на вітер, та створення складної системи керування для цього, складність конструкції лопаті (необхідне її скручування), складність обслуговування генератора, розміщеного у гондолі. Крім того, часто у таких установок необхідною є наявність механізму повороту лопатей та системи керування ним. Також необхідною є система керування орієнтацією вітрового колеса на вітер. Така значна і складна механічна система знижує надійність, підвищує періодичність технічного обслуговування, знижує строк роботи вітроустановки [51, 52].

Цих недоліків позбавлені ВЕУ з вертикальною віссю обертання. Такі ВЕУ можна використовувати без механічного регулювання кутів нахилу лопатей, вони не потребують штормового захисту, мають більш безпечну та надійну конструкцію, не потребують системи орієнтації на вітер, спрощується механічна трансмісія.

Крім того, є надзвичайно багато місць на Землі, в яких є сенс будувати системні ВЕУ з вітровими двигунами саме з вертикальною віссю обертання ротора вітрового колеса.

Якість роботи ВЕУ та їх ефективність значною мірою залежить від принципів керування ними, тому значну увагу слід приділяти розробці нових та вдосконаленню діючих систем керування.

1.2. Характеристика структур ВЕУ

У даний час для ВЕУ найбільш поширеними є асинхронні генератори із короткозамкнутим ротором. Якщо асинхронний двигун приводиться в рух із частотою більшою, ніж синхронна частота, то він буде працювати в якості генератора, тому, як правило, для ВЕУ використовуються серійні асинхронні двигуни [51, 54, 55].

АГ підключаються до мережі безпосередньо, (Рисунок 1.2). До тих пір, поки частота обертання машини перевищує синхронну частоту, вона віддає в мережу електроенергію із частотою, що рівна частоті мережі. Використання АГ із КЗ ротором дозволяє економити на додаткових системах керування, оскільки в разі використання асинхронної машини допускається менш точне підтримання частоти обертання ВК, а також АГ легше входить у синхронізм із мережею [51].

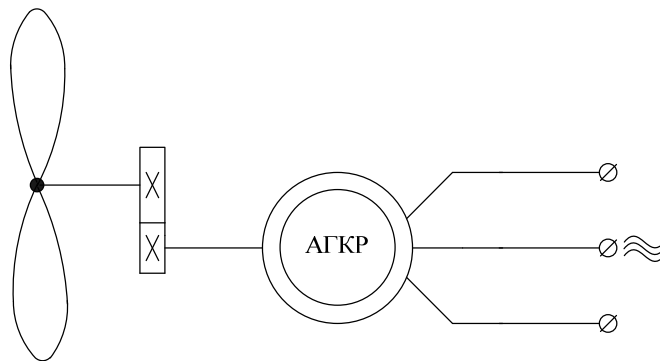


Рисунок 1.2. Схема підключення ВЕУ із використанням АГ з КЗ ротором

Іншим варіантом використання для ВЕУ АГ з КЗ ротором є схема із використанням безпосереднього перетворювача частоти. Така система, що зображена на рисунку 1.3 має більші можливості щодо керування ВЕУ, а також покращення ряду показників [54, 55, 56].

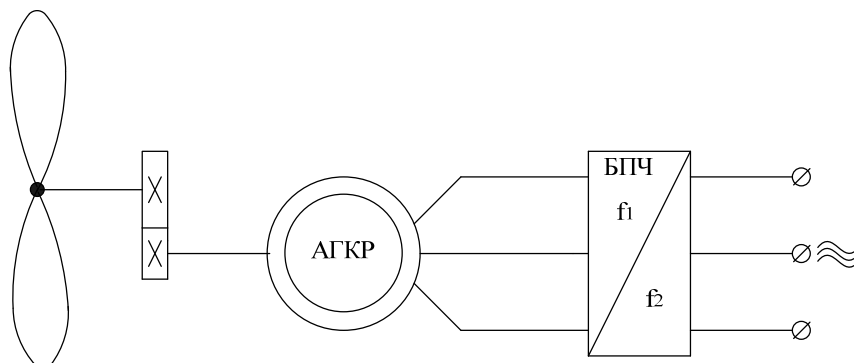


Рисунок 1.3. Схема підключення ВЕУ із використанням АГ з КЗ ротором і безпосереднього перетворювача частоти

Однак використання для ВЕУ асинхронної машини має ряд недоліків [51, 54]: при одному і тому ж вітровому режимі вона виробляє менше енергії ніж синхронна машина; вона працює з меншим коефіцієнтом потужності, обумовленим великими струмами намагнічення, які приблизно пропорційні квадрату напруги, тобто вона споживає реактивну потужність індуктивного характеру із мережі, що вимагає в ряді випадків використання компенсуючих пристроїв; обмежена можливість керування швидкістю генератора, що зводиться до аеродинамічного керування ВК або керування за допомогою зміни передаточного числа мультиплікатора. Наявність мультиплікатора знижує ККД системи.

Іншим варіантом електромеханічного перетворювача для ВЕУ є використання синхронного генератора. Найбільш проста схема, зображена на рисунку 1.4, включає в себе синхронний генератор, що працює паралельно з енергосистемою [51].

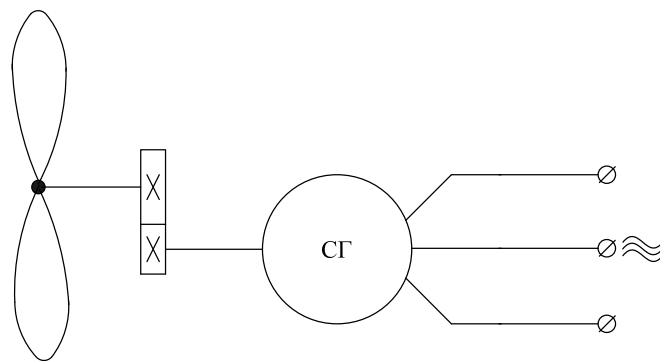


Рисунок 1.4 – Схема підключення ВЕУ із безпосереднім підключенням СГ до мережі

Оскільки, зазвичай, потужність енергосистеми набагато більша потужності ВЕУ, електрична машина буде знаходитися в синхронізмі в широкому діапазоні зміни потужності, що розвивається ВД. Перевагою СГ є можливість генерації та регулювання як активної, так і реактивної потужності, а також можливість регулювання напруги статора [54, 55]. Недоліки застосування синхронної машини із безпосередньою роботою на

енергосистему, полягають в тому, що при певних вітрових умовах вона може переходити на роботу в режим двигуна и споживати енергію із енергосистеми, машина здатна до коливань при паралельній роботі з іншими агрегатами, а при різких поривах вітру з'являється велика імовірність випадання її із синхронізму. Наступна ж синхронізація машини і підключення її до енергосистеми являється складним процесом [51, 55].

Значною мірою цих недоліків ВЕУ позбавляється при застосуванні безпосереднього перетворювача частоти, включеного між СГ та енергетичною системою, як показано на рисунку 1.5.

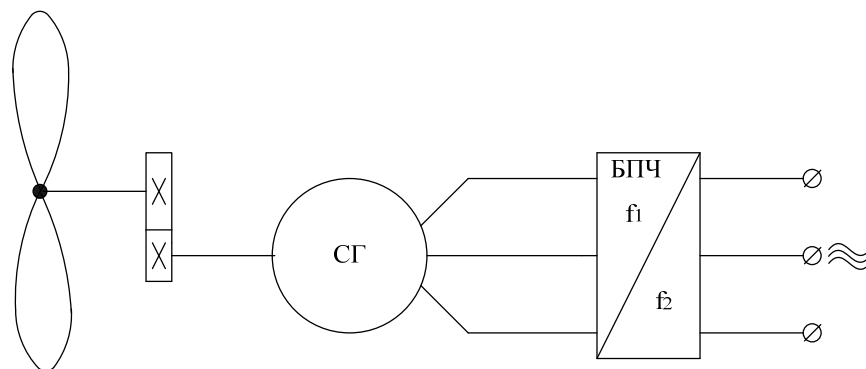


Рисунок 1.5 – Схема підключення СГ ВЕУ до мережі із застосуванням безпосереднього перетворювача частоти

Але така система має обмеження по керуванню ВЕУ, зокрема по керуванню її швидкістю обертання і моментом ВК. І звичайно ж недоліком є застосування мультиплікатора, що узгоджує частоту обертання ВК із генератором.

Суттєво кращі регульовальні можливості мають ВЕУ із застосуванням синхронного генератора і перетворювача частоти, що складається з кількох ланок.

Одним із таких варіантів структури є ВЕУ на основі синхронних генераторів із використанням додаткових перетворювачів [57, 58]. Статор синхронного генератора має трифазну обмотку, а на роторі може

знаходиться обмотка збудження або постійні магніти. На Рисунок 1.6 показана типова структура ВЕУ із синхронним генератором з використанням обмотки збудження. До мережі така установка підключена через силовий перетворювач частоти. Така система дозволяє контролювати коефіцієнт потужності і є ефективною за рахунок використання сучасних перетворювачів частоти із високим ККД.

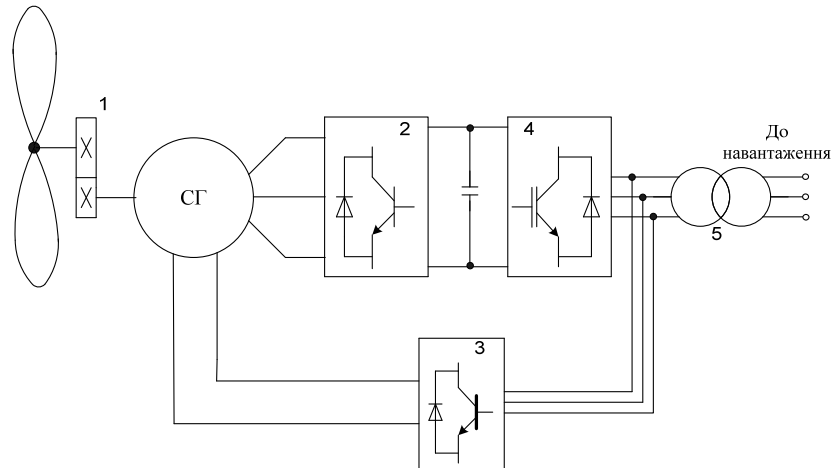


Рисунок 1.6. Конфігурація вітрової енергетичної установки із використанням синхронного генератора [57, 58]

На рисунку вітрове колесо підключено до редуктора (варіатора) 1, синхронний генератор СГ під'єднаний до мережі через два випрямлячі 2, 3, які працюють на основі широтно-імпульсної модуляції. Один з яких підключено до обмотки статора, що випрямляє напругу для інвертора 4, що через трансформатор 5 передає напругу у мережу, і може регулювати момент генератора. Інший керує випрямлячем, що живить обмотку збудження синхронного генератора.

Однак, така система потребує використання редуктора, що знижує ККД системи та синхронного генератора, розміри якого можуть бути досить значними, тобто така система є громіздкою. [58].

На рисунку 1.7 показано варіант підключення ВЕУ через редуктор 1 до мережі із використанням синхронного генератора на постійних магнітах. Перевагою такого варіанту є простота конструкції і відсутність контактних

кілець. Обмотка статора генератора підключена до мережі через діодний випрямляч 2, ШІМ-перетворювач 3 та інвертор 4. Діодний випрямляч випрямляє змінну напругу, зняту із статора генератора, ШІМ-перетворювач служить для регулювання моменту обертання вітротурбіни, для отримання максимальної потужності від ВК. Інвертор перетворює постійну напругу у змінну і віддає її у мережу, а також контролює коефіцієнт потужності [57,59].

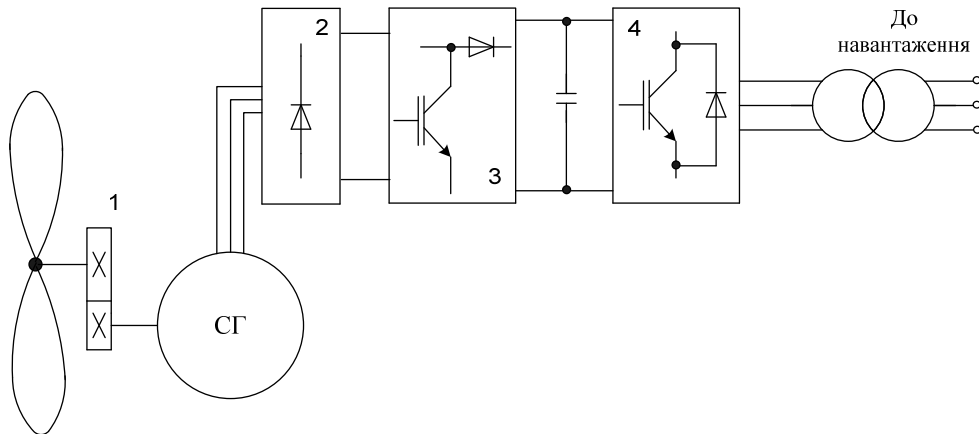


Рисунок 1.7 Структура системи ВЕУ із використанням синхронного генератора на постійних магнітах

Недоліком цієї системи, як і попередньої є використання редуктора, для підвищення частоти обертання вала, що необхідно для синхронного генератора. Наявність редуктора призводить до зменшення ККД ВЕУ. Постійні магніти в синхронному генераторі є дорогими і можуть втрачати магнітні властивості [57, 59]. Сам генератор має значні масогабаритні показники і годиться для установок невеликої потужності. Відсутня можливість прямого регулювання вихідної напруги.

В літературі [51, 54, 60] висвітлюються асинхронні генератори із подвійним живленням, в якості яких можуть застосовуватися асинхронні двигуни з фазним ротором, які можуть бути використані для ВЕУ, так як мають певні переваги.

Головна перевага асинхронного генератора з фазним ротором полягає в тому, що напруга на його виході має постійну частоту при зміні частоти обертання ротора в деяких межах.

Існують два варіанти схем із використанням генератора подвійного живлення – схема асинхронізованого синхронного генератора (АСГ) та над синхронного вентильного каскаду (НВК) [54, 55].

На Рисунок 1.8 показано схему асинхронізованого синхронного генератора із використанням в обмотці ротора безпосереднього перетворювача частоти (БПЧ), а обмотка статора напряму підключається до енергетичної системи. [54, 60].

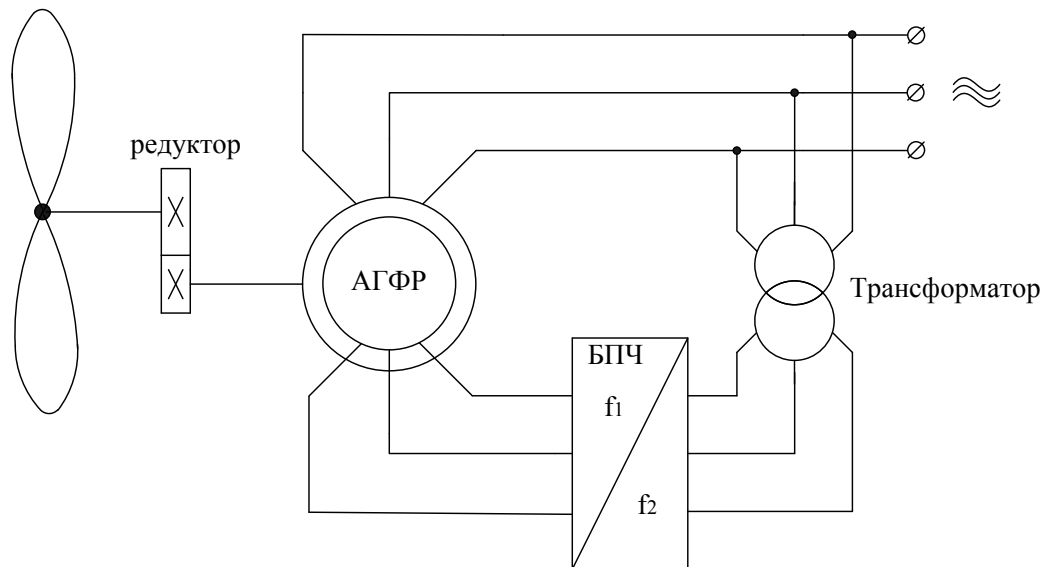


Рисунок 1.8. Схема ВЕУ на базі асинхронізованого синхронного генератора із живленням ротора через перетворювач частоти

ВЕУ на основі асинхронізованого синхронного генератора може працювати як в надсинхронному, так і в під синхронному режимах [54, 61]. Для того, щоб отримати прийнятну потужність, діаметр цих машин має бути достатньо великим [51], тобто використання серійних АД з фазним ротором обмежене. Крім того серійна машина працюватиме в режимах, далеких від номінального, що є небажаним.

На рисунку 1.9 показана спрощена схема ВЕУ із використанням надсинхронного вентильного каскаду. Обмотка статора приєднується до енергетичної системи, а обмотка ротора підключена до входу трифазного випрямляча, який з'єднано з інвертором, що ведений мережею (ІВМ) [54, 61].

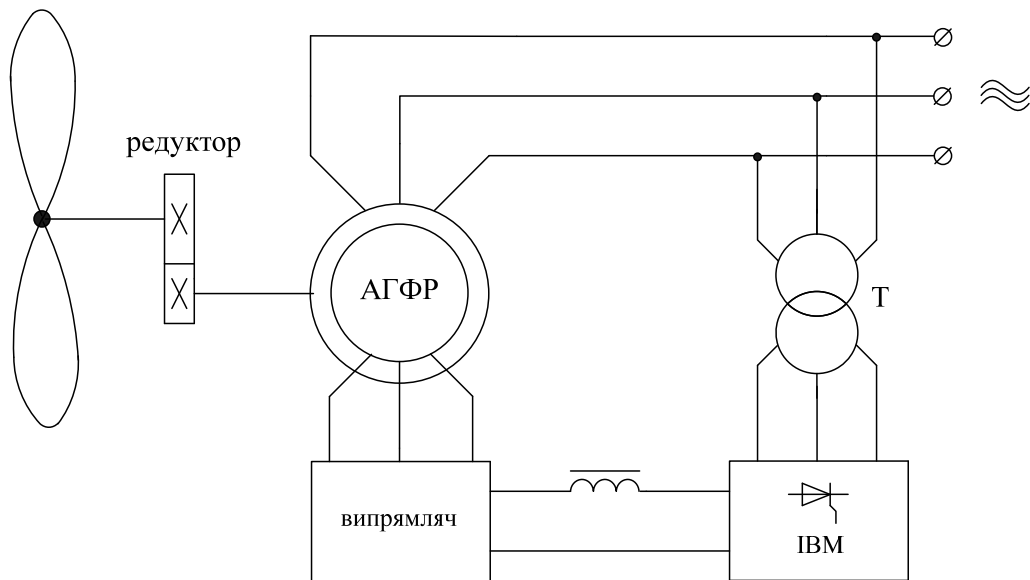


Рисунок 1.9. Схема ВЕУ із використанням НВК

Потужність в такому випадку знімається зі статора і з ротора, що збільшує коефіцієнт використання машини, а також розширює можливості керування.

Недоліком такої системи, крім перерахованих для асинхронізованого синхронного генератора, є також те, що генерування активної потужності можливе лише при надсинхронній швидкості обертання, підсинхронний режим неможливий, так як випрямляч в колі ротора може пропускати активну потужність тільки від роторної обмотки на перетворювач частоти, а не навпаки [54, 62]. Це означає необхідність в високій швидкості обертання ВК (а ВЕУ вертикального типу є тихохідними) або ж застосування мультиплікатора, котрий знизить загальний ККД системи.

1.3 Аналіз безредукторних вітрових електричних установок

Виходячи з аналізу структур ВЕУ, наведених у п. 1.1 бачимо, що майже всі структури містять у своєму складі мультиплікатор (або редуктор), який необхідний для працездатності серійних, часто високооберткових генераторів. Мультиплікатор (редуктор) знижує загальний ККД системи і є небажаною ланкою. Крім того, в усіх розглянутих вище варіантах, використовуються серійні генератори для роботи спільно з вітроколесом, які займають окрему просторову зону і часто працюють за межами номінального режиму, що негативно відображається на їх стані.

Тому особливої уваги заслуговує аналіз стану розробки і використання спеціальних тихохідних генераторів, спроектованих для ВЕУ, які мають специфічну будову і часто являють разом із ВК єдину конструкцію. А ВЕУ в такому випадку являється безредукторним електромеханічним перетворювачем.

Відомий безредукторний вітроагрегат (рисунок 1.10) [63], що містить вітроколесо 1 і магнітоелектричний генератор, ротор якого закріплений на торцевій площині вітроколеса і виконаний у формі сталевго кільця 2 з розташованими на ньому постійними магнітами 3. Статор укріплений на окремій опорі і складається з окремих шихтованих секцій трапецієподібного перерізу 4, з'єднаних між собою фланцями. На кожній секції розміщена обмотка 5. Магнітопроводи в даній конструкції мають кільцеву форму і на роторі і на статорі. Тому контур провідки магнітного потоку від кожної пари діаметрально розміщених магнітів має не радіальну а кругову симетрію.

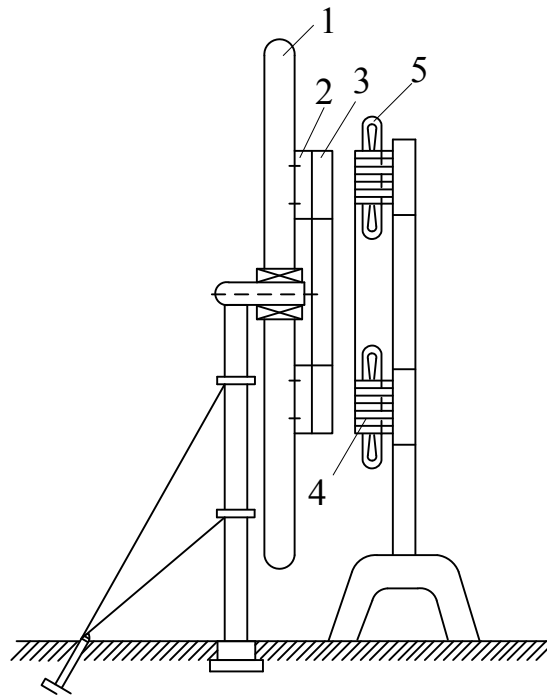


Рисунок 1.10. Конструкція безредукторного вітроагрегату з горизонтальною віссю обертання із ротором на торцевій площині вітроколеса

Дана конструкція вітроагрегата дозволяє знімати з нього високу потужність при заданих габаритах за рахунок великої довжини вітроколеса, покращуються умови тепловіддачі та вентиляції генератора.

Недоліком такого вітроагрегата є складність конструкції і завищена вага ротора, що надмірно збільшує інерційний момент вітроколеса і створює великі механічні навантаження на опорну систему, використання постійних магнітів, що унеможлиблює керування струмом збудження, залежність від напрямку вітру, що передбачає використання додаткової системи орієнтації на вітер.

Інший варіант конструкції ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну розглядається у роботі [64]. На рисунку 1.11 показано, що безредукторна ВЕУ містить вітроколесо з горизонтальною віссю із лопатями 1, ступицею 2, рухомою поворотну основу 3, що встановлено на башті 4 і хвостовий елемент 5. Статор 6 встановлений під основою і періодично входить у магнітний контакт із роторними елементами, що закріплені на

лопатах вітроколеса. В результаті чого в котушках статора буде наводитися електрорушійна сила.

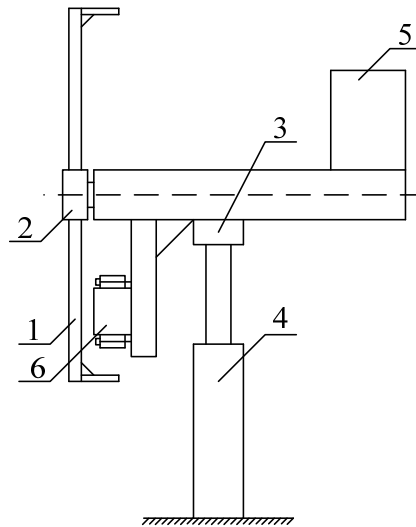


Рисунок 1.11. Безредукторний вітроагрегат з горизонтальною віссю обертання із ротором, на кінцях лопатей

Недоліком такої ВЕУ є збільшений пусковий момент, що обумовлений радіальними силами стягування роторного елемента до статорного; залежність від напрямку вітру, що вимагає додаткової системи керування; для забезпечення генерування енергії неперервно в часі, без провалів напруги, потрібна досить висока швидкість вітру, що не може бути постійним із-за природних умов, або роторні елементи мають знаходитися поряд один із одним, а такий варіант можливий при збільшенні числа лопатей вітрового колеса (оптимальним є 3 лопаті [52]), що може призвести до зменшення частоти обертання ротора відносно статора за рахунок більшого аеродинамічного опору. Як варіант – можливе виконання обода по окружності лопатей, що збільшить масогабаритні показники ВЕУ і її вартість та погіршить характеристики. Також із-за великих аеродинамічних втрат на сегментах статора і ротора та порушенні нормального обтікання лопатей, знижується коефіцієнт використання вітрової турбіни.

У роботі [65] приводиться конструкція вітроагрегата із горизонтальною віссю обертання у якій дещо зменшено пусковий момент, за рахунок того, що статорні і роторні сегменти вступають у магнітний контакт не одночасно, а по чергово, крім зазначеної переваги цій конструкції присутні усі інші недоліки, що перераховані для попереднього варіанту.

Спроба зменшити пусковий момент ВЕУ також зроблена у роботі [66]. Безредукторний вітроагрегат який складається із опорної башти 1, кріплення 2, вітроколеса 6 із лопатями 5, на кінцях лопатей укріплені роторні елементи 4, які рухаються по колу біля статорних елементів 3 (див. Рисунок 1.12). Статорні елементи виконані у вигляді стержнів із котушками. Котушки замикаються джерелом магнітного поля і секціоновані в аксіальному напрямку з утворенням рядів, що перекриваються при деформації лопаті при збільшенні вітрового напору роторними елементами. Роторні елементи виконані у вигляді гребінки, що встановлена відносно статора із зазором, профільованим по траєкторії деформації лопаті. Даний вітроагрегат має менший пусковий момент відносно аналогічних конструкцій.

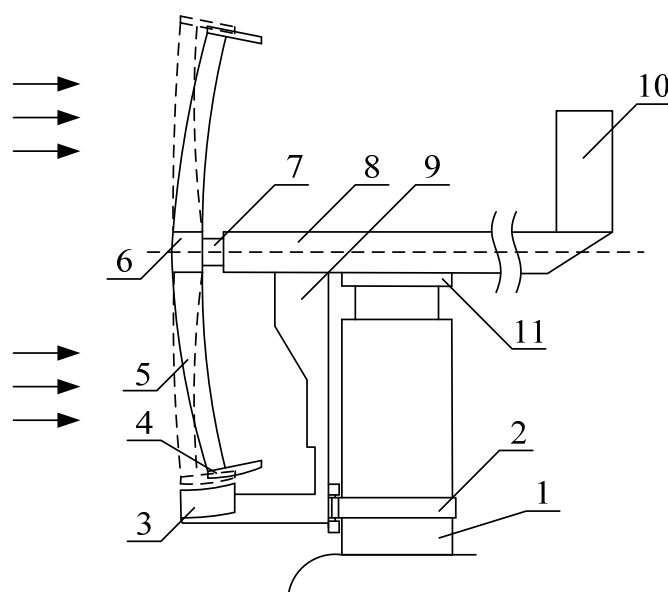


Рисунок 1.12. Конструкція безредукторного вітроагрегату з врахуванням деформації лопаті

Недоліком цього агрегату є залежність від напрямку вітру та порушення аеродинамічного обтікання лопатей через розміщені на кінцях лопатей роторні елементи, а також при вигинанні лопатей, спотворюється їх профіль, що приведе до зниження ККД.

У роботах [67, 68, 69, 70] приводяться безредукторні вітроагрегати, які мають вітроколесо із горизонтальною віссю обертання і магнітоелектричний генератор на постійних магнітах. Сегменти ротора із постійними магнітами встановлені безпосередньо на лопатях вітроколеса і обертаються разом з ним, а нерухомі сегменти статора із відповідним повітряним зазором встановлені напроти сегментів ротора і виконані у вигляді кругового статора чи у вигляді дугових статорів.

Висновок: Ключовими недоліками проаналізованих варіантів ВЕУ є: мала ефективність через низький аеродинамічний ККД вітроколеса, внаслідок порушення нормального аеродинамічного обтікання вітроколеса і великих аеродинамічних втрат та недостатнє висвітлення принципів керування, що виявлятиметься в погіршенні якості електроенергії, вироблюваної ними.

2 АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМИ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ

В роботі [72] – запропоновано вітрову енергетичну установку з вертикальною віссю обертання на базі багатополісного синхронного генератора з постійними магнітами і методику розрахунку річних електричних втрат потужності.

Недоліком запропонованої системи є використання магнітів у якості збудження, що ускладнює можливість регулювання амплітуди напруги на виводах установки.

В роботі [73] розглянуто реалізацію вітрової мікротурбінної системи для генерації електроенергії.

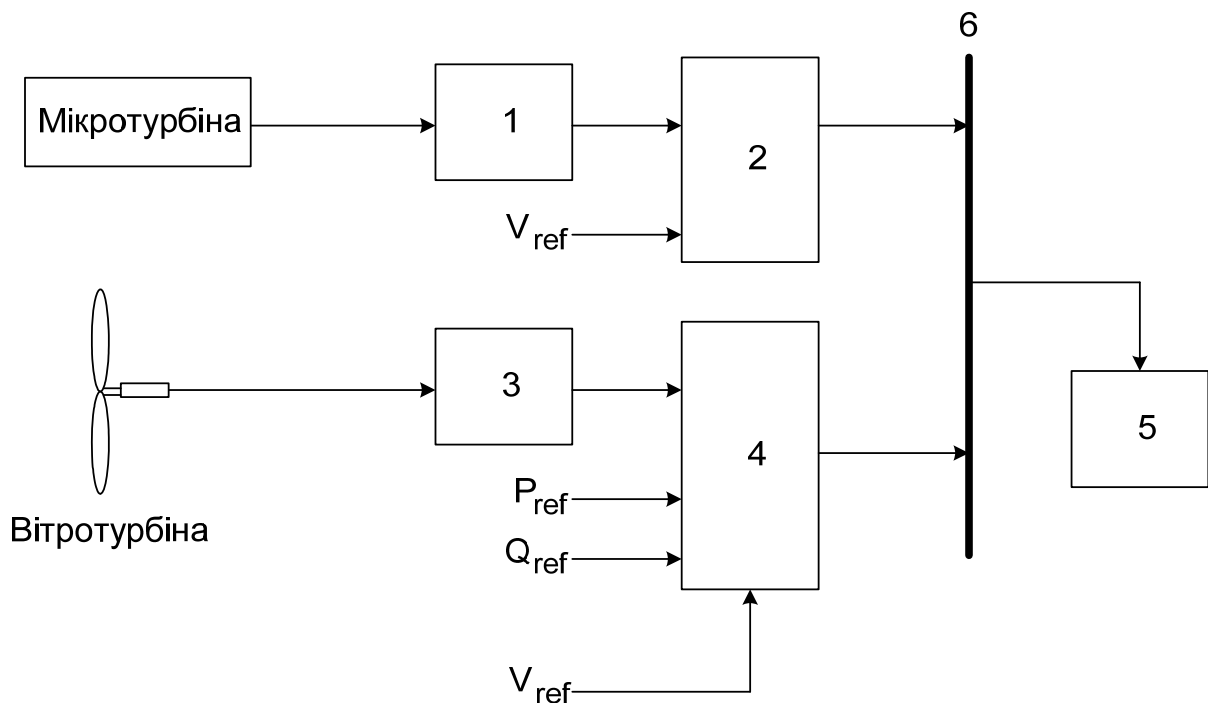


Рисунок 2.1. Блок-схема гібридної вітрової енергетичної системи

На рисунку 2.1: 1 – синхронний генератор на постійних магнітах; 2 – система керування потужністю мікротурбіни; 3 – генератор із самозбудженням; 4 – система керування потужністю основної вітротурбіни;

5 – навантаження (мережа); 6 – шина змінної напруги; V_{ref} – уставка за напругою; P_{ref} , Q_{ref} – задане значення активної та реактивної потужності відповідно.

Дана система базується на застосуванні горизонтально-осьового вітроколеса, що робить її залежною від напрямку вітру, вимагає ускладнення системи керування, що в свою чергу понижує надійність; не враховує значення похідної швидкості вітру.

Алгоритм відслідковування відбору максимуму потужності від вітроколеса у вітроенергетичній системі запропонований у роботі [57]. Алгоритм реалізовано з допомогою системи, що наведена на Рисунок 2.2.

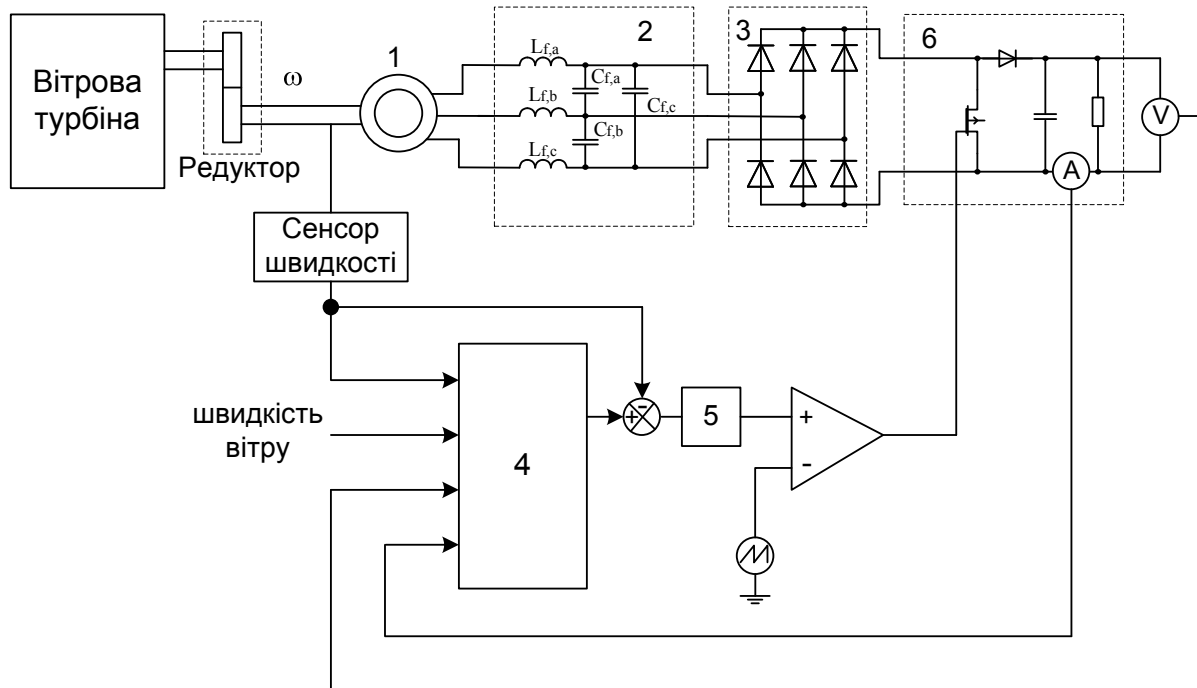


Рисунок 2.2. Система перетворення енергії вітру в електричну з відбором максимальної потужності

На рисунку 2.2: 1 – синхронний генератор на постійних магнітах; 2 – індуктивно ємнісний фільтр; 3 – трифазний випрямляч; 4 – блок обчислення точки відбору максимальної потужності; 5 – пороговий блок для обмеження швидкості обертання; 6 – конур ШІМ.

В блокові 4 відбувається обчислення алгоритму відслідковування максимуму відібраної потужності.

При вдалій технічній реалізації системи керування роботі властиві недоліки: використання генератора з постійними магнітами, редуктора, ускладнений алгоритм пошуку значення оптимальної швидкості обертання ВЕУ для відбору максимальної потужності ВК. Недосконалість виведення ВЕУ на максимальний відбір потужності, за рахунок того, що частина енергії втрачається всередині контуру ШІМ при виході швидкості вітру вище оптимальної.

В роботі [74] розглянуто варіант керування вітровою енергоустановкою, в якій для утримання вітрової турбіни в області відбору максимуму потужності використано ПІ регулятор. Така структура дає можливість утримувати вітрове колесо в оптимальній точці, однак відсутня можливість керування збудженням в функції напруги на споживачах. Таким чином при коливанні навантаження якість електроенергії від ВЕУ буде низькою.

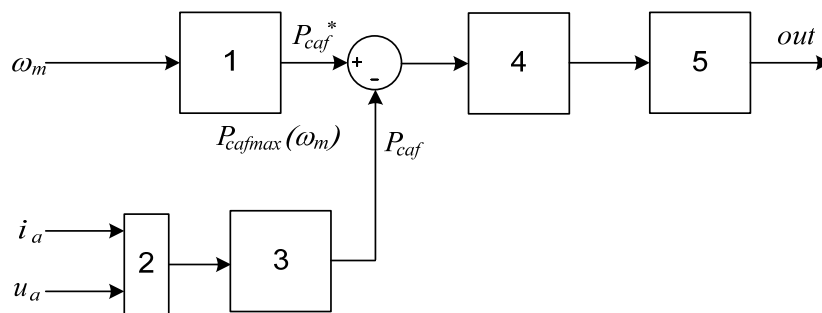


Рисунок 2.3 Структурна схема системи керування ВЕУ

На рисунку 2.3: 1 – база даних точок відбору максимальної потужності; 2 – блок множення; 3 – фільтр низьких частот; 4 – регулятор з ПІ законом регулювання; 5 – широтно-імпульсний генератор; *out* - вихід на одновібратор розрядного транзистора; ω_m – швидкість обертання колеса; i_a – струм генератора; u_a – напруга генератора; P_{caf}^* – максимальна потужність (бажана); P_{caf} – фактична потужність.

Спільним недоліком для розглянутого та попереднього варіантів являється втрата потужності в контурі ШІМ, що необхідний для повернення колеса в точку відбору максимальної потужності. Втрата потужності відбувається в тому випадку, коли турбіна працює з швидкістю ВК більшою ніж необхідна для максимального відбору потужності. В такому разі на транзистор ШІМ подаються імпульси встановленим періодом, тривалість яких пропорційна відхиленню потужності. При відкриванні транзистора генератор та пов'язані з ним ланки випрямляча переходять в режим короткого замикання, що практично призводить до гасіння енергії ВК у внутрішньому контурі ВЕУ, параметри короткого замикання в запропонованих генераторах з постійними магнітами не контрольовані, що також є недоліком розглянутих варіантів.

В роботі [75] розглядається система керування ВЕУ із застосуванням векторного керування перетворювачем частоти, що дозволяє живити споживачів з активною та реактивною потужністю електроенергією належної якості. Недоліком такої системи, структура якої наведена на Рисунок 2.4 є відсутність зворотних зв'язків за напругою на навантаженні та струмом, що призводить до відхилення напруги на виводах установки.

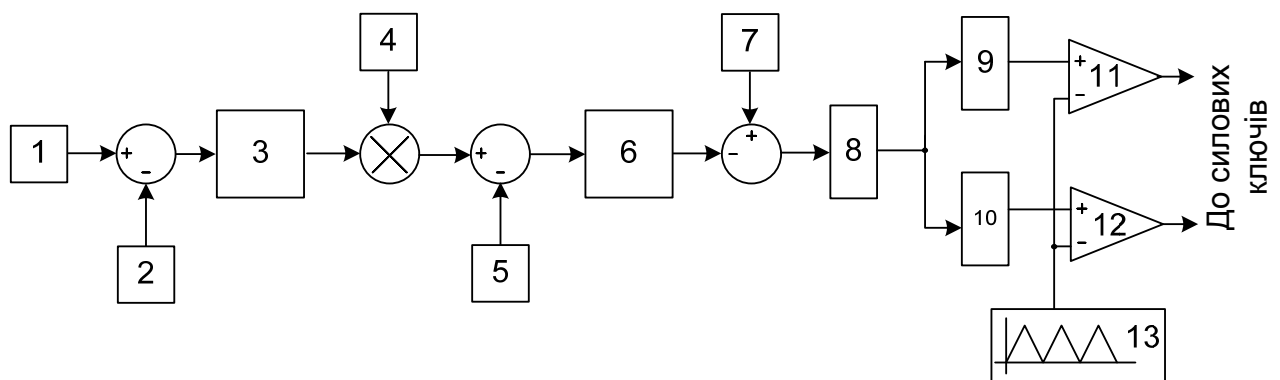


Рисунок 2.4. Спосіб керування ланкою DC/AC ВЕУ з перетворювачем частоти

На рисунку 2.4: 1 – задатчик напруги шини постійного струму; 2 – сенсор напруги шини постійного струму; 3 – регулятор напруги; 4 – блок

опорної напруги; 5 – сенсор струму шини постійного струму; 6 – регулятор струму; 7 – блок демпфування; 8 – блок ділення; 9, 10 – масштабатори; 11, 12 – компаратори; 13 – генератор пилкоподібної напруги.

У роботі [76] для забезпечення оптимальної швидкості обертання вітроколеса пропонується, керуючи випрямлячем, змінювати струм заряду акумулятора, впливаючи тим самим на момент навантаження генератора. Такий підхід не враховує таке негативне явище як перезаряд акумулятора, коли виникає необхідність у його від'єднанні від кола заряду, при цьому відбір потужності від вітроколеса уже не буде максимальним. Крім того застосування даної схеми розраховане лише на автономне навантаження.

Система керування ВЕУ, що зображена на Рисунок 2.5, розглядається у роботі [77]. В даному випадку розглядається система керування асинхронізованим синхронним генератором, в якості якого пропонується використовувати серійний асинхронний двигун з фазним ротором або спеціально спроектований генератор.

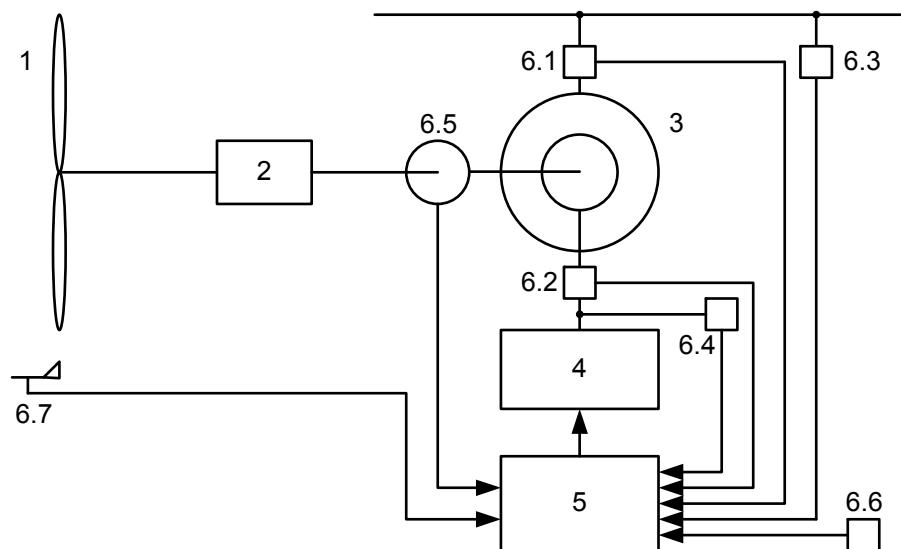


Рисунок 2.5. Принципова схема системи керування віротурбіною із АСГ

На рисунку 2.5: 1 – віротурбіна; 2 – трансмісія; 3 – електрична машина АСГ; 4 – збуджувач; 5 – регулятор збудження; 6.1 і 6.2 – сенсори струму ротора і статора; 6.3. і 6.4 – сенсори напруги статора і ротора; 6.5 –

сенсор кутового положення ротора; 6.6 – сенсор кута, що позначає вектор напруги мережі; 6.7 – сенсор швидкості вітру.

Дана система призначена для керування вітротурбіною без аеродинамічного керування лопатями, із максимальним можливим відбором потужності від вітроколеса, тобто із максимальним коефіцієнтом енергетичної віддачі. Для цього пропонується впливати на момент генератора шляхом зміни величини струму збудження. А частоту напруги статора АСГ пропонується підтримувати, подаючи на ротор напругу збудження із частотою ковзання.

Недоліком такої системи є те, що регулювання швидкохідності турбіни здійснюється шляхом введення в коло статора генератора активного опору, на якому втрачатиметься частина генерованої потужності. Використання в якості генератора серійного асинхронного двигуна з фазним ротором означає, що він використовуватиметься в режимі, далекому від номінального, що небажано (перегрів, тощо). Для отримання необхідної потужності, діаметр генератора має бути досить великим, внаслідок низької частоти обертання вітроколеса, або необхідна наявність механічного редуктора, який знизить ККД системи.

Методи, розглянуті в [78], засновані на принципі навантаження вітрової турбіни з метою забезпечення вироблення ВЕУ максимально можливої потужності від вітрової енергії. Обидва методи, описані в [78] працюють із такими параметрами вітрової турбіни як обертовий момент, потужність та крива коефіцієнта потужності. Це дозволяє визначити точку відбору максимальної потужності. У [78] розглядається два подібних методи, які відрізняються тим, що для першого з них необхідний анемометр для реального, фізичного вимірювання швидкості вітру, а у другому методі швидкість вітру обчислюється, виходячи із електричних параметрів. Перевагою цих методів являється те, що є можливість швидкого визначення оптимальної швидкості обертання ВК та легка реалізація цього, завдяки

простому програмуванню всіх параметрів турбіни, і визначення оптимальної точки здійснюється шляхом аналізу цих параметрів. Недоліком описаних методів є те, що вони розраховані лише під певну ВЕУ і при застосуванні іншої вітрової турбіни, необхідним є повне перепрограмування системи, згідно нових параметрів. Також недоліком є те, що не враховуються можливі атмосферні зміни, такі як вологість, запиленість, обледеніння, наявність опадів, зміна густини повітря, тощо. Це негативно впливатиме на точність системи керування ВЕУ.

Алгоритм пошуку точки відбору максимальної потужності, що запропонований в [79] використовує високоефективне управління та контроль максимального обертового моменту для підвищення вихідної потужності турбіни. Даний алгоритм, з нашої точки зору, можна представити у вигляді болк-схеми (Рисунок 2.6).

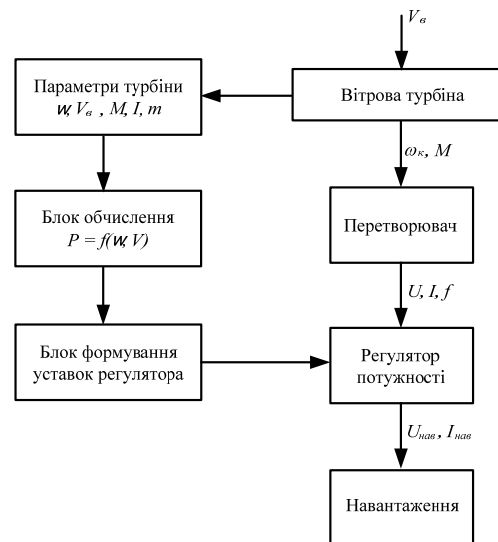


Рисунок 2.6 Блок-схема алгоритму пошуку точки відбору максимальної потужності згідно [79].

На основі характеристик певної турбіни обраховується залежність між оптимальним обертовим моментом генератора та його швидкістю. По даній залежності проходить відслідковування максимального обертового моменту. Для кожної окремо взятої швидкості вітру обертовий момент генератора врівноважує механічний обертовий момент від ВК таким чином, щоб він був

оптимальним для збільшення відбору потужності. Ця можливість є завдяки тому, що керування обертовим моментом генератора здійснюється в такий спосіб, щоб момент був оптимальним. Недоліком цього методу можна вважати залежність від параметрів турбіни, що не дозволяє використовувати його для різних вітрових турбін, так як кожна турбіна має відмінні від іншої параметри, а також не враховується атмосферний вплив.

Метод, запропонований в [80] – це метод розширеного висхідного пошуку оптимальної точки роботи ВЕУ, що дає максимальне підвищення потужності шляхом визначення потужності на виході інвертора та напруги лінії постійного струму. В даній роботі [80] звертається увага на те, що алгоритм використовує залежність між механічною потужністю турбіни та вихідною потужністю електричної системи, між якими і здійснюється корегування. Алгоритм, що відпрацьовує згадана система керування ВЕУ складається із трьох основних стадій (кроків): початкова, тренувальна та стадія застосування. Даний метод піддається навчанню завдяки інтелектуальній пам'яті, а це дозволяє застосувати його до різних турбін, що розв'язує задачу настройки різних алгоритмів для різних вітрових турбін. Але цей алгоритм є досить повільним та складним, оскільки складається з трьох робочих стадій. Додатковим недоліком алгоритму варто назвати і неможливість врахування змін густини повітря та атмосферних впливів, що може впливати на характеристики потужності.

В роботі [81] описано, що вітрова турбіна під'єднана до споживача через випрямляч та DC/DC перетворювач. Запропонований алгоритм відбору максимальної потужності регулює робочу точку вітрової системи шляхом безпосереднього налаштування робочого циклу DC/DC перетворювача на основі порівняння показників вихідної напруги. Таким чином, алгоритм коригує робочу точку на основі змін потужності по відношенню до робочого циклу.

Запропонований в [82] алгоритм визначає пік потужності шляхом зміни еталонної швидкості у відповідному напрямку. В залежності від величини та напрямку зміни активної потужності еталонна швидкість модифікується до оптимальної робочої точки. Даний алгоритм можна проілюструвати у вигляді графіка на Рисунок 2.7.

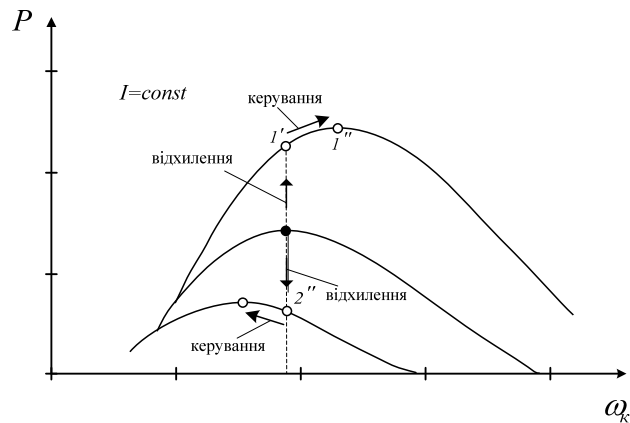


Рисунок 2.7 Графічне пояснення алгоритму пошуку точки відбору максимальної потужності згідно

Висновок.

Аналіз існуючих варіантів систем керування для вітроенергетичних установок показав ряд недоліків. До основних слід віднести відсутність керування збудженням електромеханічного перетворювача (редукторного чи безредукторного), що перешкоджає отриманню електроенергії належної якості. Іншим важливим моментом являється недосконалість способу виходу вітрової установки на точку відбору максимальної потужності.

ЗРОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ

3.1 Характеристика ВЕУ як об'єкта керування та електротехнічного комплексу

Робота ВЕУ з вертикальною віссю обертання характеризується залежністю коефіцієнту потужності від швидкохідності ВЕУ [52]. На Рисунок 3.1 а взятому із [26] приведено графік залежності коефіцієнту потужності вітроколеса C_p від його швидкохідності λ , а на рисунку 3.1 б — залежність вихідної потужності вітроколеса P_{BK} від кутової швидкості обертання, на якому показано оптимальне значення кутової швидкості обертання вітрового колеса ω_{opt} , при якій від ВЕУ відбирається максимум потужності.

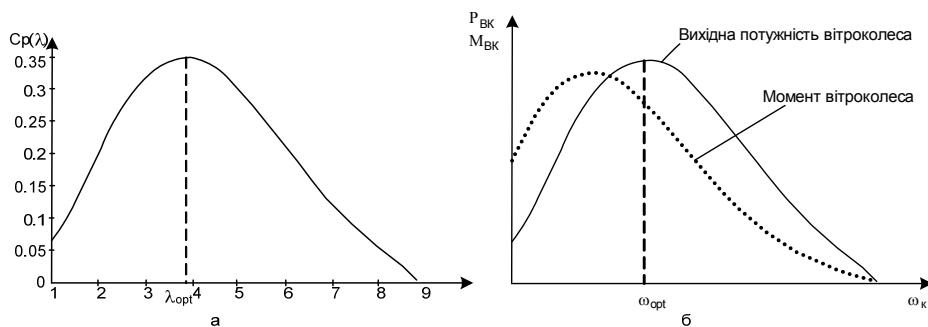


Рисунок 3.1. Характеристики вітрового колеса з вертикальною віссю обертання [76]: а) залежність коефіцієнта потужності C_p від швидкохідності λ ; б) залежності вихідної потужності і моменту вітрового колеса від його кутової швидкості

При роботі вертикального вітрового колеса існує поняття роботи в точці відбору максимальної потужності. З графіків, видно, що максимальний відбір потужності від вітрового колеса буде при певній оптимальній швидкості

обертання вітрового колеса, при збільшенні якої коефіцієнт потужності буде падати.

Розглянемо ідеологію побудови такої системи керування вертикально-осьовою ВЕУ, яка працює не на окреме навантаження, а на електричну мережу. В даному випадку необхідно підтримувати оптимальну швидкість обертання вітрового колеса і максимум потужності, що відбирається від нього, шляхом керування струмом збудження ВЕУ: якщо змінювати струм збудження ВЕУ, змінюватиметься амплітуда вихідної напруги установки як і амплітуда напруги на виході інвертора, що призведе до зміни струму навантаження (струму, який віддається у мережу умовно необмеженої ємності), а це призведе до зміни моменту навантаження вітрового колеса і до установки оптимальної швидкості обертання вітрового колеса відповідно до поточної швидкості вітру. Така система дасть змогу автоматично підтримувати кутову частоту обертання вітроколеса шляхом дії на момент навантаження ВЕУ, при цьому швидкість буде стабілізуватися за рахунок збільшення струму віддачі у мережу.

Важливою складовою розв'язку поставленої задачі є особливість конструктивного виконання ВЕУ. Для даної задачі доцільно використовувати ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну з вертикальною віссю обертання, на ободі ротора якої розміщена обмотка збудження, а навколо обмотки збудження нерухомо закріплена обмотка статора.

Для отримання максимального значення коефіцієнта потужності необхідно підтримувати струм збудження установки а значить і магнітний потік та взаємодію між вітровим колесом і навантаженням вітрової енергетичної установки (електричною мережею) на тому рівні, щоб підтримувалась оптимальною швидкість обертання її ротора.

Структуру системи автоматичного керування ВЕУ, яка забезпечуватиме цю оптимальність можна побудувати, виходячи з наступного.

Базуючись на відомих співвідношеннях [52] та [87] і математичній моделі кривої намагнічування, представленої у роботі [54] сукупністю прямої та параболи, запишемо математичну модель вітроенергетичної установки

$$\begin{cases}
 \omega_k = \frac{\lambda V_B}{R}, \\
 \Phi(I_{зб}) = \begin{cases} -a_2 \cdot I_{зб}^2 + b_2 \cdot I_{зб}, & I_{зб} \in [0, I_{зб\text{сп}}), \\ a_1 + b_1 \cdot I_{зб}, & I_{зб} \in (I_{зб\text{сп}}, \infty], \end{cases} \\
 E = 4,44 \cdot w \frac{\omega_k p}{2\pi} \cdot \Phi \cdot \sqrt{2}, \\
 U_{\text{ст}} = E - I_{\text{н}} Z_{\text{ст}}, \\
 M_{\text{об}} - M_{\text{нав}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega_k}{dt}, \\
 M_{\text{нав}} = \frac{m U_{\text{ст}} E}{\omega_k X_d} \sin \Theta - \frac{m U_{\text{ст}}^2}{2 \omega_k} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\Theta.
 \end{cases} \quad (3.1)$$

де ω_k – кутова швидкість обертання вітрового колеса, рад/с; λ – швидкохідність вітрового колеса, яка залежить від конструкції колеса; V_B – швидкість вітру, м/с; R – радіус вітрового колеса; Φ – магнітний потік, Вб; $I_{зб\text{сп}}$ – значення струму збудження у точці спряження параболи і прямої; a_1, b_1, a_2, b_2 – константи, метод визначення яких наведено у роботі [90]; $I_{зб}$ – стум збудження, А; E – е.р.с. вітрової енергетичної установки, В; w – число витків обмотки; p – число пар полюсів; $U_{\text{ст}}$ – вихідна напруга вітрової енергетичної установки на статорі, В; $I_{\text{н}}$ – струм навантаження вітрової енергетичної установки, А; $Z_{\text{ст}}$ – повний опір обмотки статора, Ом; $M_{\text{об}}$ – момент обертання на валу ВК, Нм, $M_{\text{нав}}$ – момент навантаження ВЕУ, Нм; J_{Σ} – сумарний момент інерції ВЕУ, кг.м².

Модель (3.1) була розв'язана у ППП Matchcad. для вітрової турбіни із вертикальною віссю обертання, яка має такі параметри: $D=0,6$ м; $\omega_k = 8 \div 100$ рад/с; $P_{\text{вт}} = 2000$ Вт. Вітроенергетичні характеристики даної турбіни приведені на рисунку 3.2

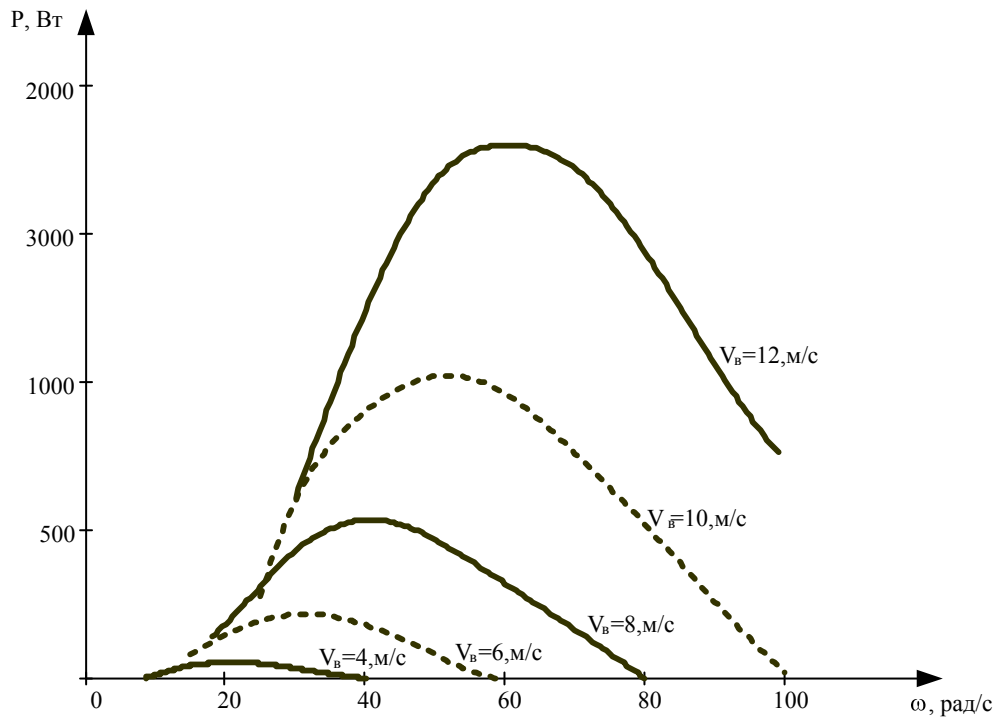


Рисунок 3.2. Характеристики вітрової турбіни з вертикальною віссю обертання

Для дослідження моделі ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну було прийнято ряд значень швидкості вітру, який набігає на вітротурбіну, що відповідає різним ustalеним режимам як показано на Рисунок 3.3.

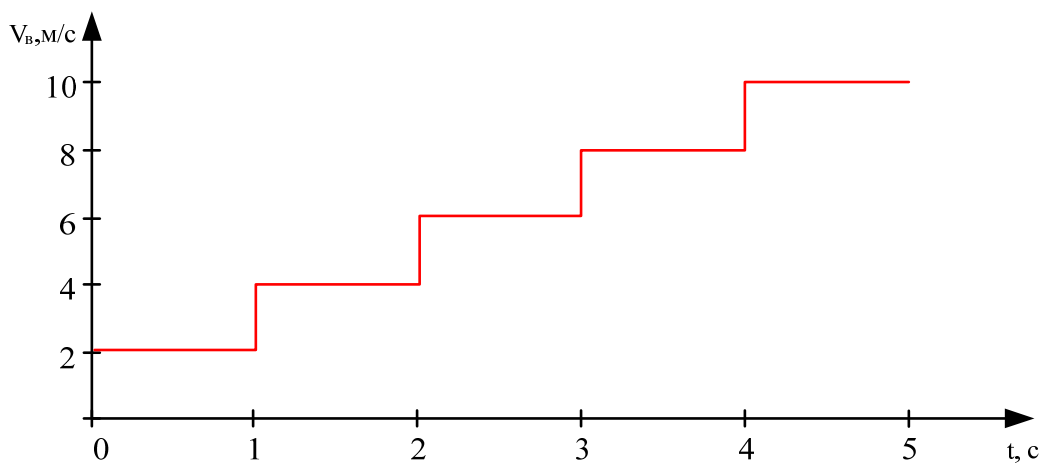


Рисунок 3.3. Швидкість вітру, що набігає на вітрове колесо

Відповідно до графіка зміни швидкості вітру, зміна кутової швидкості обертання вітрового колеса, моменту, потужності вітрової турбіни, які

обчислені відповідно до (3.1) матимуть вигляд згідно Рисунок 3.4, 3.5, 3.6 відповідно.

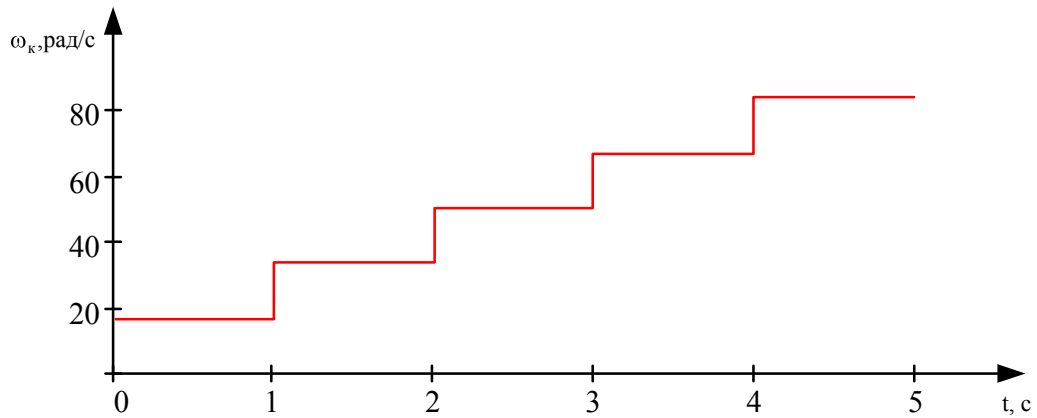


Рисунок 3.4. Графік зміни кутової швидкості обертання вітрового колеса

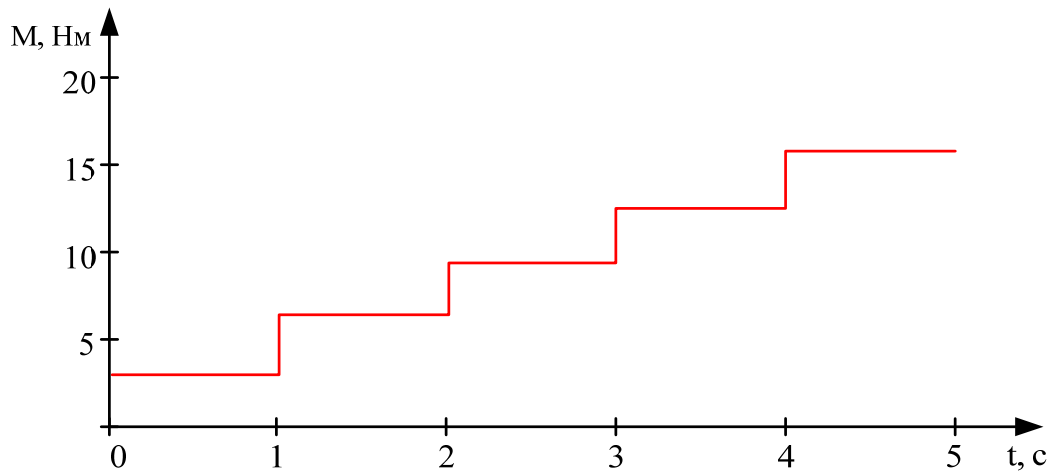


Рисунок 3.5. Графік зміни моменту на валу вітрового колеса

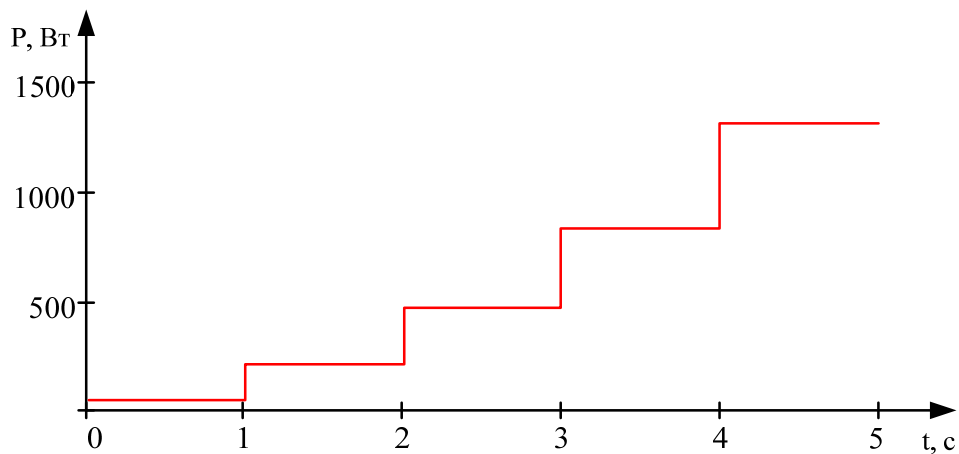


Рисунок 3.6. Графік зміни потужності вітрового колеса

Маючи значення потужності вітрової турбіни при відповідних значеннях швидкості вітру та швидкості обертання вітрового колеса, побудуємо криву зміни потужності, при постійному навантаженні на вітроенергетичних характеристиках (Рисунок 3.7).

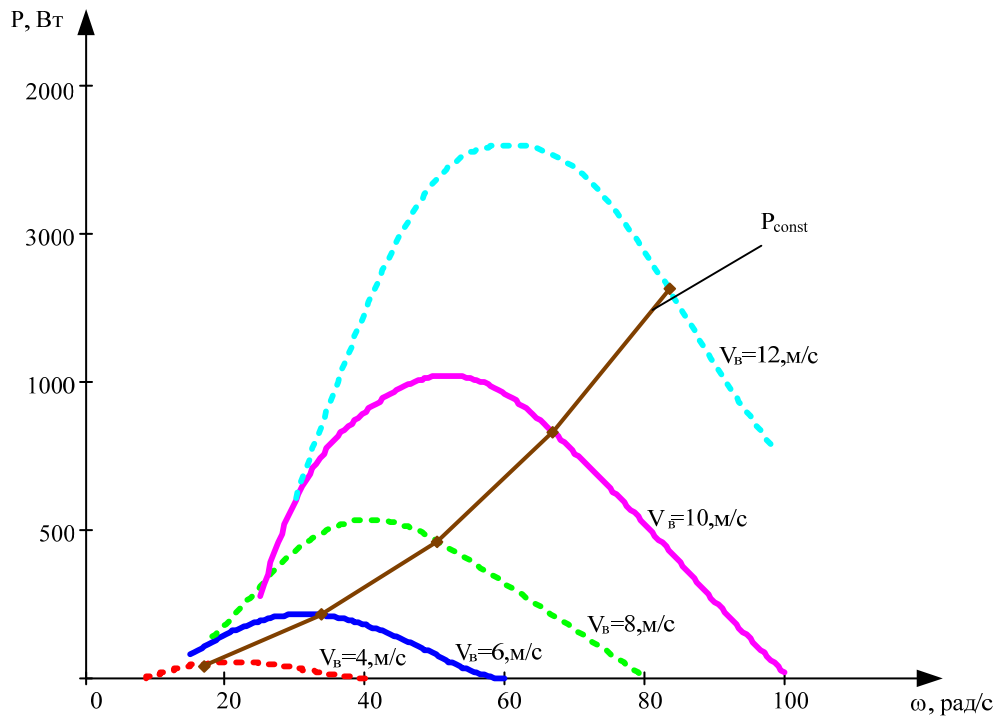


Рисунок 3.7 Крива потужності вітрової турбіни при її роботі із постійним навантаженням

Із рисунка 3.7 видно, що при роботі ВЕУ із постійним навантаженням, її потенціал використовується не повністю, при чому на малих швидкостях вітру турбіна перевантажена, а на вищих – недовантажена, тобто робота ВЕУ відбувається на кутовій швидкості колеса, відмінній від оптимальної в ту чи іншу сторону.

Для збільшення ефективності використання потужності вітрового потоку і більш повного використання потенціалу вітрової турбіни, на підставі (3.1) структуру електротехнічного комплексу, основною ланкою якого є ВЕУ, можна представити так, як показано на Рисунок 3.8, на якому вітроколесо, що обертається під дією вітрового потоку з кутовою швидкістю ω_k генерує на виході статорної обмотки ОС напругу $U_{ст}$, яка подається через випрямляч на

інвертор. На виході випрямляча розміщується акумуляторна батарея АБ, що служить для живлення обмотки збудження ОЗ в момент пуску вітроколеса. Постійна напруга за допомогою інвертора перетворюється у змінну синусоїдальну напругу заданої частоти (в нашому випадку — 50 Гц) і через фільтр подається у мережу. Для синхронізації фазового кута між напругою інвертора та напругою у мережі використано блок синхронізації. Сигнали від датчиків швидкості вітру, кутової швидкості обертання вітрового колеса, похідної від ковзного значення швидкості вітру, струму навантаження і напруги статора подаються на регулятор збудження, який їх аналізує та видає сигнал на блок керування збудженням для підтримки струму збудження, а отже і моменту навантаження, на такому рівні, при якому швидкість обертання вітроколеса призводить б до оптимального відбору потужності [144].

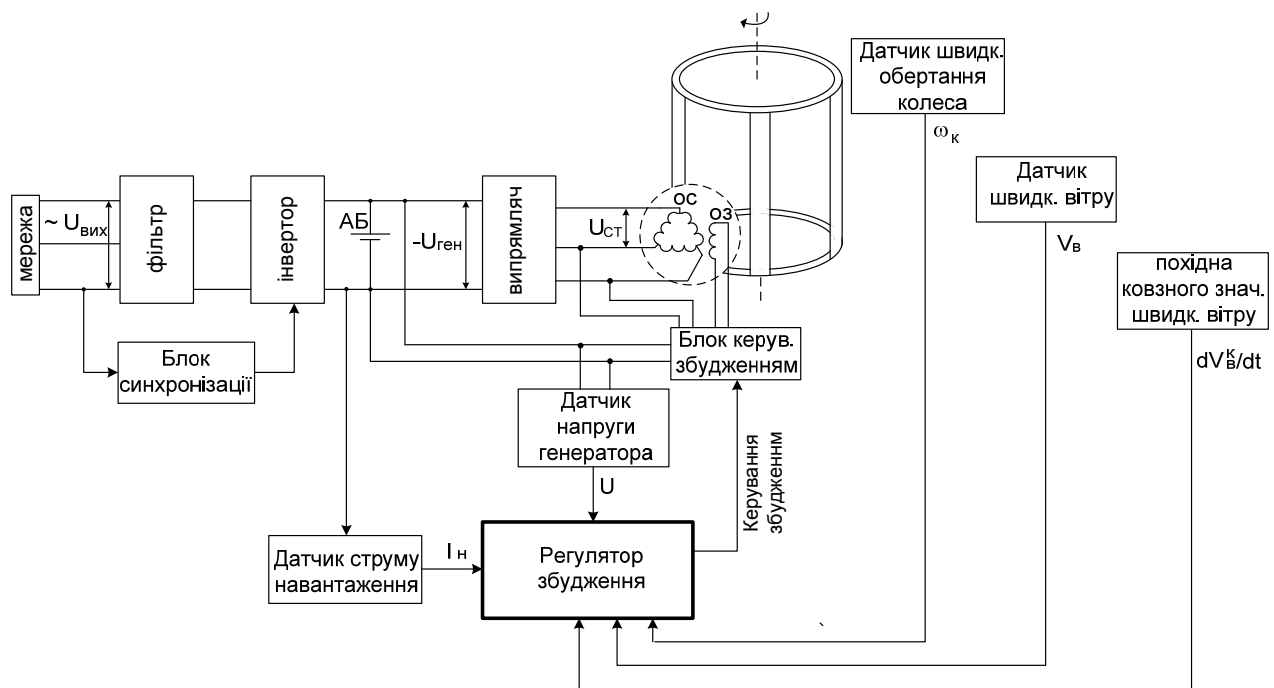


Рисунок 3.8. Структура електротехнічного комплексу на основі ВЕУ з вертикальною віссю обертання

Різницю між потужністю ВЕУ, що працює з постійним навантаженням та максимально можливою її потужністю, можна проілюструвати графіками (1) та (2) на вітроенергетичних характеристиках (Рисунок 3.9)

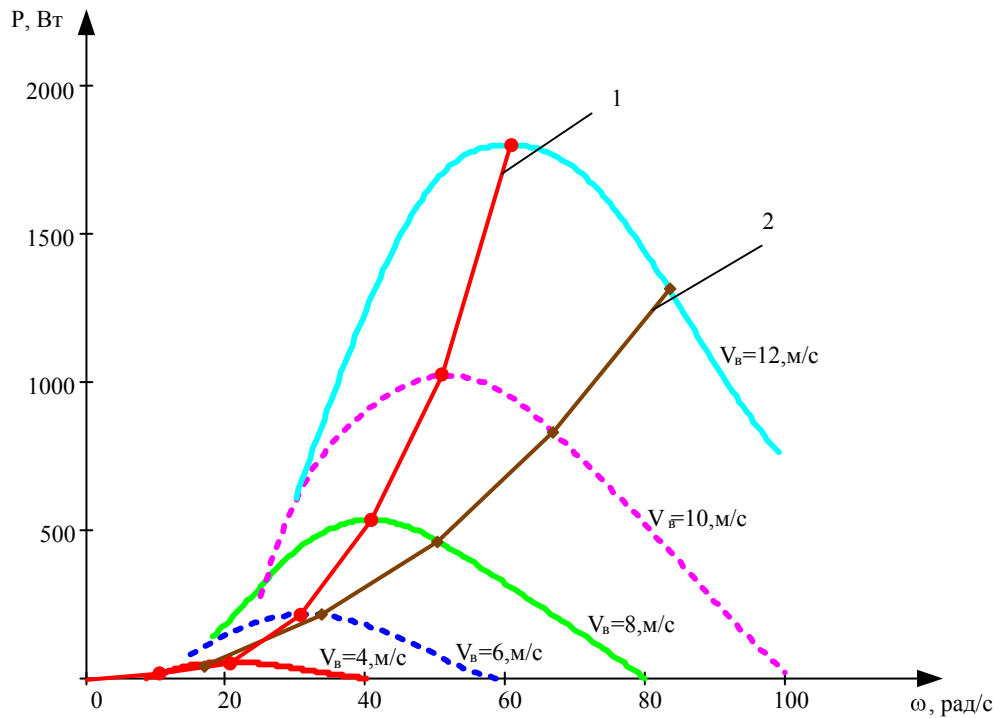


Рисунок 3.9 Криві потужностей вітрової турбіни при її роботі із постійним навантаженням (2) та максимальною потужністю (1)

У часі, зміну потужностей по кривим (1) та (2) в одній системі координат можна представити на Рисунок 3.10

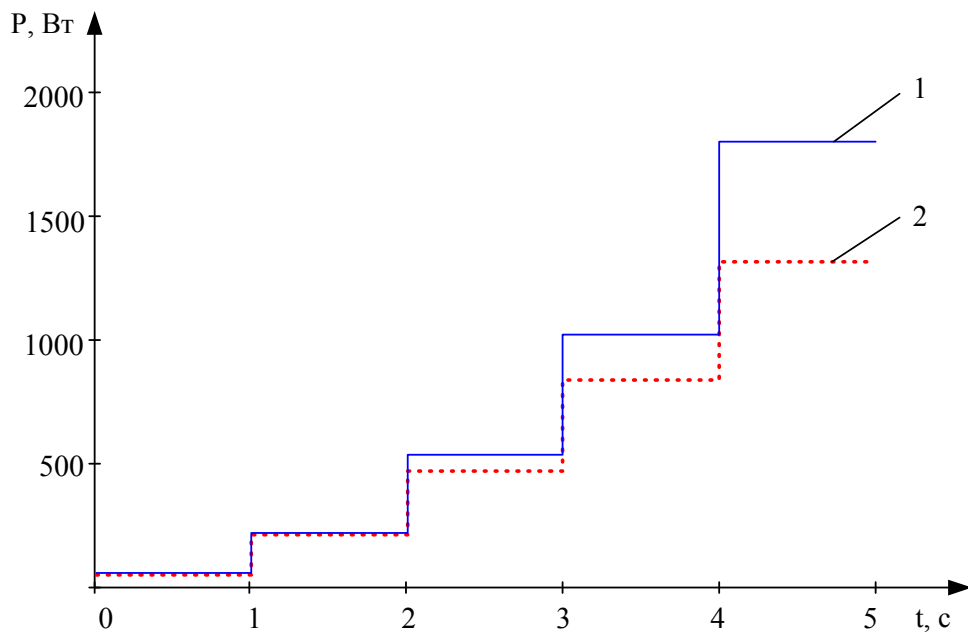


Рисунок 3.10 Потужність, вироблена турбіною турбіни при її роботі із постійним навантаженням (2) та максимальною можливою потужністю (1)

Покажемо окремим графіком різницю між максимально можливою потужністю турбіни P_{\max} та виробленою потужністю при постійному навантаженні P_{const} у абсолютних ΔP та у відсотках δP в залежності від кутової швидкості обертання ВК (Рисунок 3.11 та Рисунок 3.12).

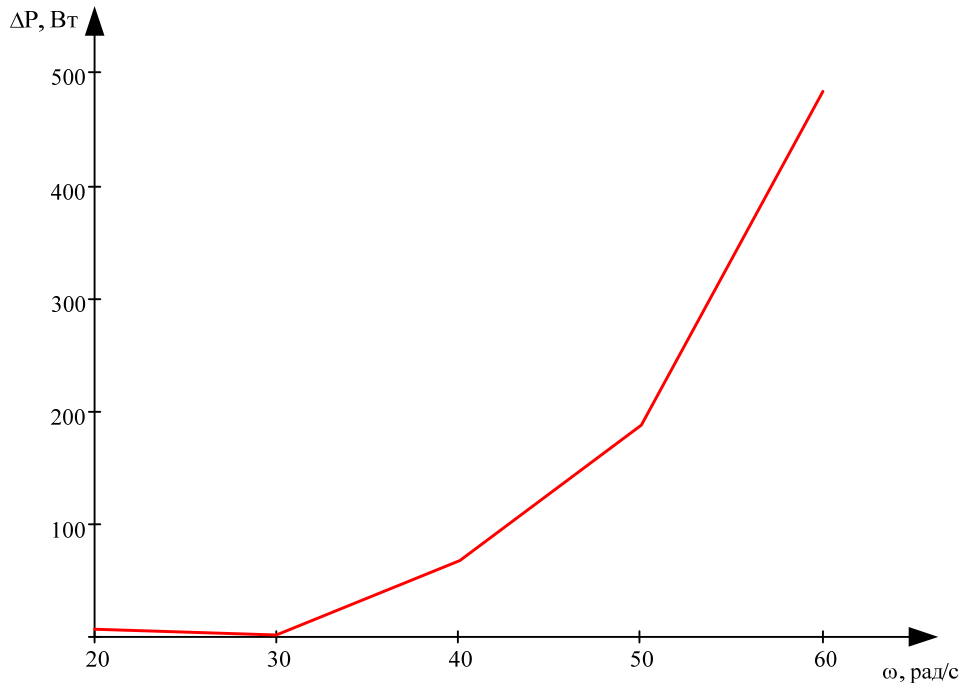


Рисунок 3.11. Різниця між максимально можливою потужністю та потужністю, турбіни при її роботі із постійним навантаженням у абсолютних ОДИНИЦЯХ

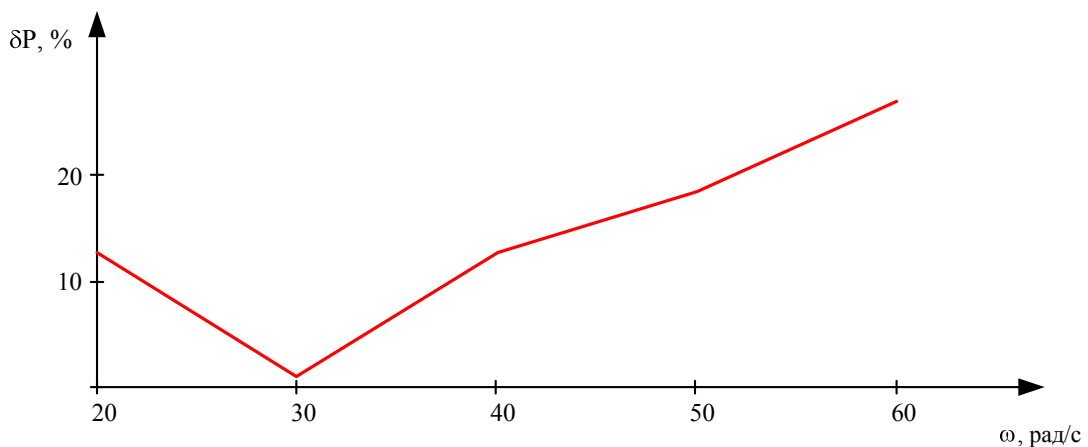


Рисунок 3.12. Різниця між максимально можливою потужністю та потужністю, турбіни при її роботі із постійним навантаженням у відсотках

3.2 Розробка закону керування регулятора збудження, та його структури

Вхідними величинами для регулятора збудження пропонується встановити наступні: швидкість обертання вітрового колеса ω_k , швидкість вітрового потоку V_B , похідна від ковзного за $2T$ значення швидкості вітру dV_B^k/dt , струм навантаження вітрової енергетичної установки I_H , вихідна випрямлена напруга вітрової енергетичної установки U .

Запропонована структура регулятора збудження побудована за каскадним принципом, де внутрішнім контуром є контур регулювання напруги, а зовнішнім контуром є контур підтримання швидкості вітрового колеса.

Відомо, що для каскадної системи регулювання сигнал завдання для регулятора внутрішнього контуру формується регулятором зовнішнього контуру, тому розглянемо детально будову і математичну модель регулятора зовнішнього контуру — контуру підтримки заданої швидкості.

Пропонується ввести до закону регулювання також похідну від ковзного за $2T$ значення швидкості вітру, оскільки вітрове колесо має значну інерційність, тобто при зміні вітру швидкість його обертання змінюється не одразу, але все рівно ця зміна відбудеться. Вихідним сигналом контуру є сигнал завдання за напругою, який буде вхідним сигналом для наступного контуру.

Використовуючи підхід, запропонований в роботі [91] математичну модель контуру підтримання заданої швидкості можна записати у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\omega = \begin{cases} |\omega_{\text{опт}} - \omega(t)| - k_v \cdot V_B(t), \text{ якщо } \frac{dV_B^k}{dt} < 0, \\ |\omega_{\text{опт}} - \omega(t)| + k_v \cdot V_B(t), \text{ якщо } \frac{dV_B^k}{dt} > 0, \end{cases} \\ U_{\text{зад}}(t) = k_\omega \cdot \Delta\omega + \int_0^{2T} \Delta\omega dt. \end{array} \right. \quad (3.2)$$

де $\Delta\omega$ – різниця між заданим і поточним значенням кутової швидкості; $\omega_{\text{опт}}$ – значення оптимальної швидкості обертання; $\omega(t)$ – значення кутової швидкості в поточний момент часу; k_v – коефіцієнт передачі по швидкості вітру; $V_b(t)$ – значення швидкості вітру в поточний момент часу; V_b^k – ковзне за $2T$ значення швидкості вітру (усереднення за $2T$); dV_b^k/dt – похідна від ковзного за $2T$ значення швидкості вітру; $U_{\text{зад}}(t)$ – задання випрямленої напруги вітрової енергетичної установки в поточний момент часу; k_ω – коефіцієнт передачі по кутовій швидкості обертання колеса; T – період обертання вітрового колеса.

Зовнішній контур являється контуром регулювання напруги, вхідним сигналом для якого є $U_{\text{зад}}(t)$. Його математичну модель запишемо у вигляді

$$\begin{cases} \Delta U = U_{\text{зад}}(t) - (U(t) - k_I I_n(t)), \\ I_{\text{зб}}(t) = k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt. \end{cases} \quad (3.3)$$

де ΔU – різниця між заданим і поточним значенням випрямленої напруги; k_I – коефіцієнт передачі по струму навантаження; I_n – поточне значення струму навантаження вітрової енергетичної установки, А; $I_{\text{зб}}$ – поточне значення струму збудження вітрової енергетичної установки, А; k_u – коефіцієнт передачі по напрузі.

Для захисту вітроенергетичної установки від роботи на холостому ході, тобто для зняття струму збудження при швидкості обертання колеса нижче мінімально допустимої, при якій можлива генерація енергії в електричну мережу $\omega_{\text{мін}}$, введемо в закон регулювання дискретну величину $k_{\text{роб}}$. Тоді загальна модель регулятора збудження може бути представлена у вигляді системи рівнянь

$$\begin{cases}
 \Delta\omega = \begin{cases} |\omega_{\text{опт}} - \omega(t)| - k_v \cdot V_B(t), & \text{якщо } \frac{dV_B^K}{dt} < 0, \\ |\omega_{\text{опт}} - \omega(t)| + k_v \cdot V_B(t), & \text{якщо } \frac{dV_B^K}{dt} > 0, \end{cases} \\
 U_{\text{зад}}(t) = k_\omega \cdot \Delta\omega + \int_0^{2T} \Delta\omega dt, \\
 \Delta U = U_{\text{зад}}(t) - (U(t) - k_I I_H(t)), \\
 I_{\text{зб}}(t) = \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt \right).
 \end{cases} \quad (3.4)$$

Або, зробивши всі необхідні підстановки, загальний закон регулювання регулятора, який показує безпосередній зв'язок вихідної величини із вхідною, запишемо у вигляді

$$I_{\text{зб}}(t) = \begin{cases}
 \left(k_u \cdot \left(k_\omega \cdot (|\omega_{\text{онм}} - \omega(t)| - k_v \cdot V_e(t)) + \int_0^{2T} (|\omega_{\text{онм}} - \omega(t)| - k_v \cdot V_e(t)) dt - (U(t) - k_I I_H(t)) \right) + \int_0^T \left(k_\omega \cdot (|\omega_{\text{онм}} - \omega(t)| - k_v \cdot V_e(t)) + \int_0^{2T} (|\omega_{\text{онм}} - \omega(t)| - k_v \cdot V_e(t)) dt - (U(t) - k_I I_H(t)) \right) dt, \text{ якщо } \frac{dV_e^K}{dt} < 0, \right. \\
 \left. k_u \cdot \left(k_\omega \cdot (|\omega_{\text{онм}} - \omega(t)| + k_v \cdot V_e(t)) + \int_0^{2T} (|\omega_{\text{онм}} - \omega(t)| + k_v \cdot V_e(t)) dt - (U(t) - k_I I_H(t)) \right) + \int_0^T \left(k_\omega \cdot (|\omega_{\text{онм}} - \omega(t)| + k_v \cdot V_e(t)) + \int_0^{2T} (|\omega_{\text{онм}} - \omega(t)| + k_v \cdot V_e(t)) dt - (U(t) - k_I I_H(t)) \right) dt, \text{ якщо } \frac{dV_e^K}{dt} > 0. \right.
 \end{cases} \quad (3.5)$$

Запропонований закон регулювання дозволяє автоматично регулювати збудження вітроенергетичної установки для підтримки оптимального значення швидкості обертання вітрового колеса.

Для захисту вітроенергетичної установки від роботи на холостому ході, тобто для зняття струму збудження при швидкості обертання колеса нижче мінімально допустимої, при якій можлива генерація енергії в електричну мережу ω_{min} , введемо в закон регулювання дискретну величину $k_{\text{роб}}$ та отримаємо остаточний закон регулювання

$$I_{\text{зб}}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} k_u \cdot \left(k_\omega \cdot (|\omega_{\text{ном}} - \omega(t)| - k_v \cdot V_e(t)) + \right. \\ \left. + \int_0^{2T} (|\omega_{\text{ном}} - \omega(t)| - k_v \cdot V_e(t)) dt - (U(t) - k_I I_n(t)) \right) + \\ + \int_0^T \left(k_\omega \cdot (|\omega_{\text{ном}} - \omega(t)| - k_v \cdot V_e(t)) + \right. \\ \left. + \int_0^{2T} (|\omega_{\text{ном}} - \omega(t)| - k_v \cdot V_e(t)) dt - (U(t) - k_I I_n(t)) \right) \end{array} \right] dt \\ \left[\begin{array}{l} k_u \cdot \left(k_\omega \cdot (|\omega_{\text{ном}} - \omega(t)| + k_v \cdot V_e(t)) + \right. \\ \left. + \int_0^{2T} (|\omega_{\text{ном}} - \omega(t)| + k_v \cdot V_e(t)) dt - (U(t) - k_I I_n(t)) \right) + \\ + \int_0^T \left(k_\omega \cdot (|\omega_{\text{ном}} - \omega(t)| + k_v \cdot V_e(t)) + \right. \\ \left. + \int_0^{2T} (|\omega_{\text{ном}} - \omega(t)| + k_v \cdot V_e(t)) dt - (U(t) - k_I I_n(t)) \right) \end{array} \right] dt \end{array} \right. \cdot k_{\text{роб}}, \text{ якщо } \frac{dV_e}{dt} < 0, \quad (3.6)$$

$$\cdot k_{\text{роб}}, \text{ якщо } \frac{dV_e}{dt} > 0.$$

де $k_{\text{роб}}=1$, якщо $\omega(t) > \omega_{\text{min}}$, та $k_{\text{роб}}=0$, якщо $\omega(t) < \omega_{\text{min}}$.

Структурна схема регулятора збудження, побудована відповідно до системи (3.6), наведена на Рисунок 3.13, де ФП – функціональний перетворювач, який забезпечує поступання на вимірювальний вхід суматора сигналу про швидкість вітру відповідно до закону (3.6) із вибраним знаком при активному відповідному компараторі.

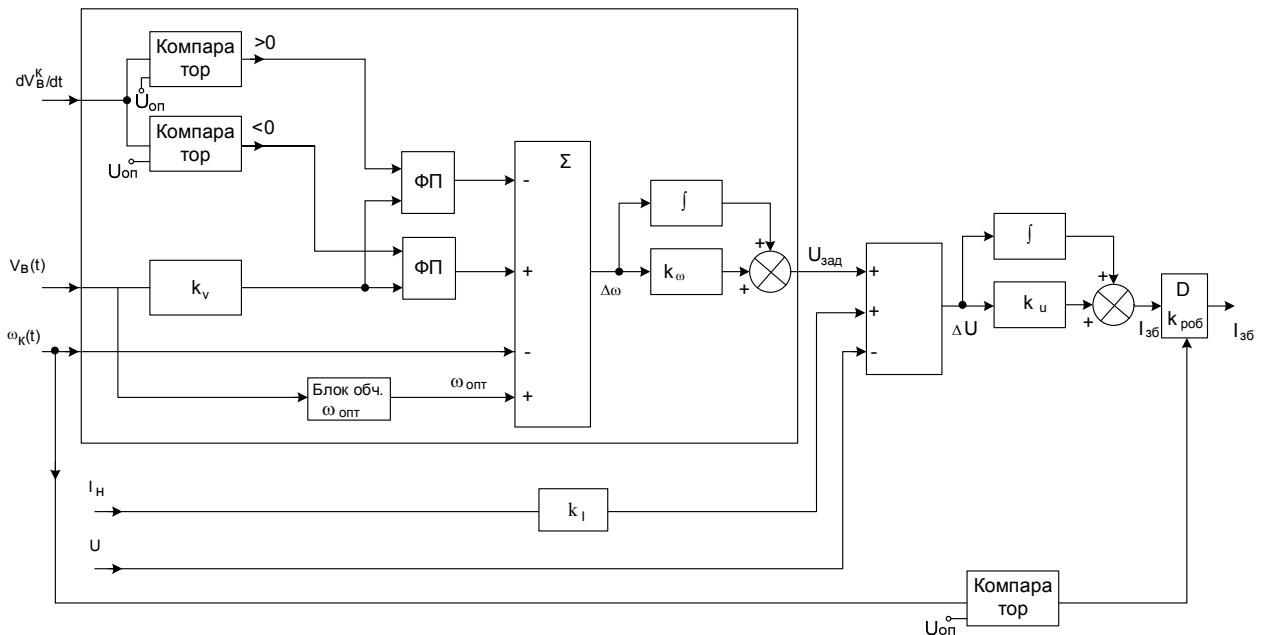


Рисунок 3.13. Структура регулятора збудження

3.3 Синтез регулятора швидкості обертання вітрового колеса з використанням нечіткої логіки

Важливою умовою підвищення техніко-економічних показників ВЕУ є відповідність характеристик агрегату вітровому режиму [93]. На даний час існує багато систем керування вітровими енергетичними установками, які зокрема дозволяють працювати ВЕУ із нерегульованою швидкістю, забезпечуючи при цьому відбір максимальної потужності від вітроколеса, шляхом дій на момент навантаження генератора [76]. Більшість існуючих систем потребують вдосконалення законів керування, за якими вони працюють. При керуванні вітровою енергетичною установкою доводиться стикатися із певною мірою невизначеними вихідними даними, параметрами системи. Вітроенергетичний агрегат працює по некерованому графіку [93]. Особливістю системи автоматичного керування ВЕУ є те, що вона являється нелінійним нестационарним об'єктом керування і знаходиться під впливом динамічних вітрових навантажень. Вітрова енергія має стохастичну природу, тому з

врахуванням інертності системи доцільним є керування ВЕУ з прогнозуванням рівня вхідної енергії [93, 94].

Істотним зауваженням щодо використання існуючих законів керування за принципом power point tracking (PPT) являється спрощений підхід визначення залежності між швидкістю вітру в даний момент часу і швидкістю вітрового колеса, що дає змогу знайти координати точки відбору максимальної потужності. Недостатнє врахування всіх факторів, які впливають на різницю між відносними значеннями швидкості вітру та швидкості обертання вітрового колеса приводить до погіршення стійкості систем автоматичного керування, відхилення напруги на виводах ВЕУ, що ускладнює її експлуатацію при паралельній роботі з мережею. Вказаними факторами являються відносна вологість повітря, наявність опадів, запиленість, атмосферний тиск в зоні розташування ВЕУ тощо. Ці величини змінюються (іноді досить суттєво) на протязі доби, сезону, року [95]. Врахування таких чинників також обумовлює використання математичного апарату нечітких множин для побудови моделі автоматичного регулятора.

В такому випадку управління матиме нечіткий характер, що дозволить застосувати метод нечіткого керування в області вітроенергетики.

Вирішення поставленої задачі може бути здійснено завдяки визначенню функції оптимальної потужності вітрової турбіни з вертикальною віссю обертання та застосуванню теорії нечітких множин для синтезу цифрових нечітких регуляторів [96]. Використання нечітких регуляторів дозволяє підвищити динамічну точність та швидкодію систем автоматичного керування нестационарними об'єктами за рахунок формалізації процесу прийняття рішень на основі нечіткої логіки при кількісних параметрах стану системи [97]. Системи автоматичного керування для відновлювальних енергетичних установок на основі нечітких регуляторів в багатьох випадках довели свою ефективність завдяки тому, що дозволяють отримати більш високу якість регулювання (менші похибки в перехідних та сталих режимах) [94, 98].

Доповнення закону керування (3.4) можна провести із застосуванням елементів нечітких множин, що дозволить реалізувати контур регулювання швидкості обертання вітрового колеса автоматичного регулятора збудження на контролері з підтримкою команд Fuzzy Logic та покращити якість регулювання потужності ВЕУ в умовах дій стохастичних навантажень вітру.

При роботі ВЕУ прямого перетворення енергії на мережу через інвертор (Рисунок 3.2), сигнали про значення швидкості вітру, кутової швидкості обертання вітрового колеса, похідної від ковзного значення швидкості вітру, струму навантаження і напруги статора подаються на регулятор збудження, який їх аналізує та видає сигнал на блок керування збудженням для підтримки струму збудження, а отже і моменту навантаження, на такому рівні, при якому встановиться оптимальна швидкість обертання вітроколеса, що призводить до максимального відбору потужності.

Для аналітичного опису функції максимальної потужності вітрової турбіни з вертикальною віссю обертання, яка необхідна для обчислення значень ω_{opt} , використаємо поліноміальний ряд. Функція представлена у вигляді максимумів вітроенергетичних характеристик $P_{BT}=f(\omega_k)$ при різних швидкостях вітру, для вітрової турбіни, яка використана для розв'язку математичної моделі (3.1).

Використавши ППП Mathcad знайдемо значення коефіцієнтів поліномів:

$$A = [0; 0,584; 0,173; -0,024; 0,00103; -2,478 \cdot 10^{-5}; 1,68 \cdot 10^{-7}]$$

Отже, остаточний вираз функції:

$$P_{\max}(\omega_k) = 0,584 \cdot \omega_k + 0,173 \cdot \omega_k^2 - 0,024 \cdot \omega_k^3 + 0,0013 \cdot \omega_k^4 - 2,478 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_k^5 + 1,68 \cdot 10^{-7} \cdot \omega_k^6 \quad (3.7)$$

Графічне зображення знайденого виразу показано на Рисунок 3.14.

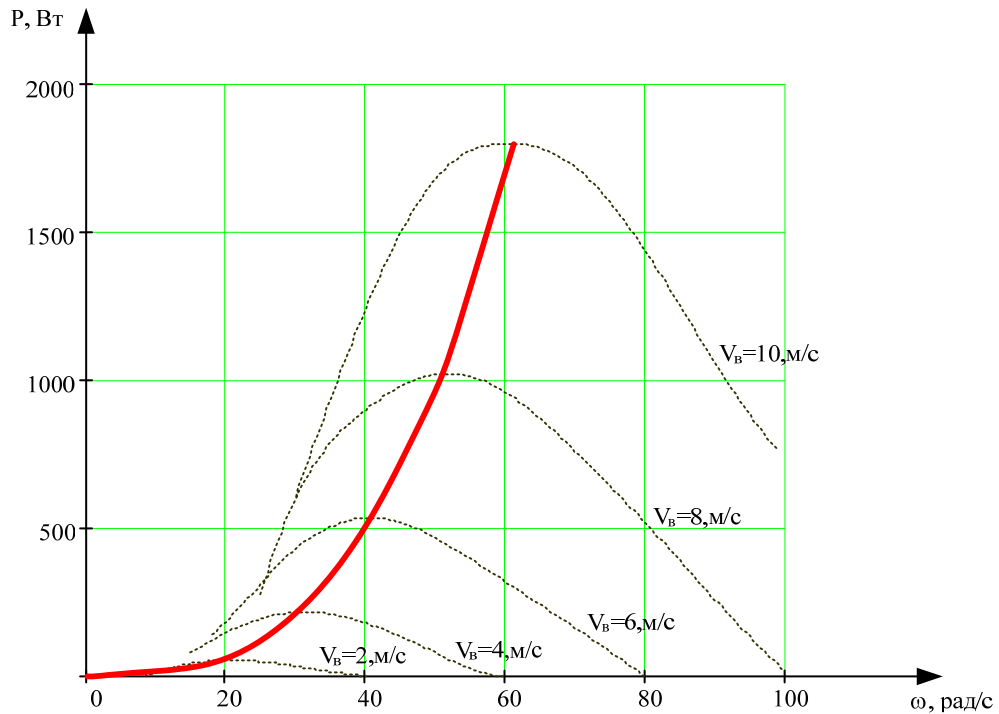


Рисунок 3.14. Функція максимумів потужностей вітроенергетичних характеристик

Для синтезу підпорядкованого регулятора швидкості, що реалізує одну із функцій в законі (3.6), вихідний сигнал якого доцільно подавати на регулятор збудження, використаємо теорію нечітких множин, це дозволить отримати більш високу якість регулювання. При цьому слід враховувати нелінійну залежність максимальної потужності ВЕУ при різних швидкостях вітру від кутової швидкості обертання вітроколеса (рисунок 3.14).

Структурну схему каналу регулювання системи керування в цьому випадку можна представити у вигляді зображеному на рисунку 3.15.

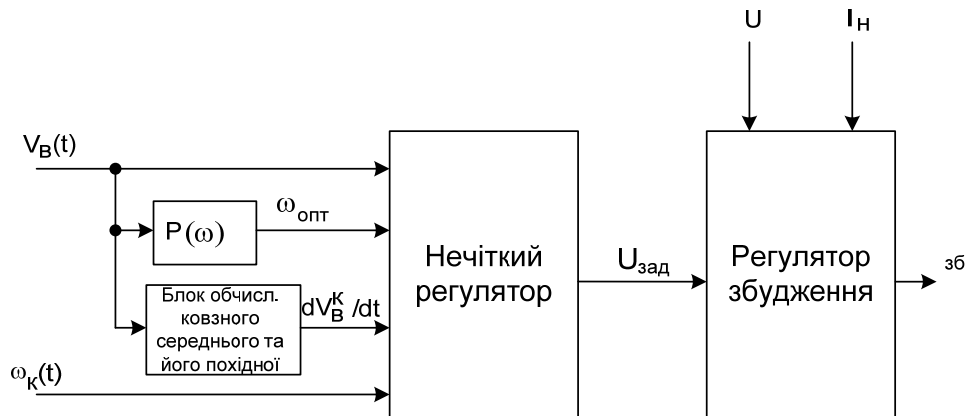


Рисунок 3.15. Структурна схема каналу регулювання системи керування вітровою енергетичною установкою

На вхід нечіткого регулятора швидкості пропонується подавати такі сигнали – кутову швидкість обертання вітрового колеса ω_k , швидкість вітрового потоку V_B , похідну від ковзного значення швидкості вітру dV_B^k/dt , яка обчислюється блоком обчислення ковзного середнього та його похідної, оптимальне значення кутової швидкості ω_{opt} , при якому від вітроколеса відбирається максимум потужності, причому ω_{opt} обчислюється блоком залежності $P(\omega)$, в якому закладена крива (3.7). Вихідним сигналом нечіткого регулятора є сигнал завдання за напругою $U_{зад}$, який буде вхідним сигналом для тривходового регулятора збудження, для якого вхідними сигналами також є значення напруги на виході випрямляча U та струму навантаження I_n . Вихідним сигналом каналу регуляторів системи керування є сигнал струму збудження, який через блок керування збудженням змінює значення струму збудження ВЕУ відповідно до заданого закону.

Блок нечіткого логічного висновку про значення напруги завдання можна представити у вигляді структури, зображеної на рисунку 3.16.

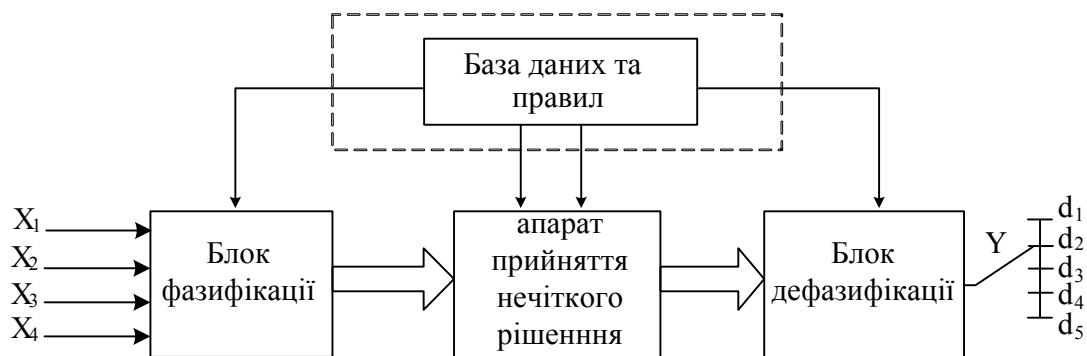


Рисунок 3.16. Структурна схема блоку нечіткого логічного висновку системи керування ВЕУ з нечітким висновком про зміну струму збудження

Визначимо діапазон зміни вхідних і вихідних величин та проведемо їх лінгвістичну оцінку, згідно термів, що занесені до табл. 3.1:

Таблиця 3.1 – Характеристика вхідних та вихідних величин математичної моделі нечіткого висновку про напругу завдання регулятора струму збудження

Пара-метри	Назва	Діапазон значень	Терми
X_1	Відносне значення швидкості вітру	$(0 \dots 1,6)$ $V_{\text{ном}}$	Дуже мале (ДМ), мале (М), середнє (С), велике (В), дуже велике (ДВ)
X_2	Відносне значення кутової швидкості обертання вітрового колеса	$(0 \dots 1,2)$ $\omega_{\text{ном}}$	Дуже мале (ДМ), мале (М), середнє (С), велике (В), дуже велике (ДВ)
X_3	Похідна від ковзного значення швидкості вітру	$-1 \dots +1$	Знижується (Н), не змінюється (0), зростає (В).
X_4	Значення оптимальної швидкості обертання	$-1 \dots +1$	Менше оптимуму (М), оптимальне (Н), більше оптимуму (Б)
Y	Значення напруги завдання для регулятора струму збудження	$(0 \dots 1.2)$ $U_{\text{ном}}$	Близьке до нуля (d_1), низьке (d_2), середнє (d_3), високе (d_4), максимальне (d_5)

Наступним кроком створення нечіткої математичної моделі є фазифікація вхідних величин X згідно термів, і одержання нечіткої множини \tilde{X} . Використовуючи гаусівську функцію [99, 100] належності (ФН), що відповідає нормальному уявленню експертів про належності вхідної величини до вибраних термів (2.48):

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2 \cdot c^2}\right) \quad (3.8)$$

де b – координата максимуму; c – коефіцієнт концентрації.

Розрахунок параметрів функції належності вхідних величин здійснимо і зведемо їх в таблиці. 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри функції належності вхідних та вихідних величин

Змінні	Терми	Параметри ФН		Змінні	Терми	Параметри ФН	
		центр, b	розтяг, c			центр, b	розтяг, c
X_1	ДМ	0	0,1699	X_4	М	-1	0,4247
	М	0,4			Н	0	
	С	0,8			Б	+1	
	В	1,2					
	ДВ	1,6					
X_2	ДМ	0	0,1274	Y	ДМ	0	0,1274
	М	0,3			М	0,3	
	С	0,6			С	0,6	
	В	0,9			В	0,9	
	ДВ	1,2			ДВ	1,2	
X_3	Н	-1,2	0,5				
	0	0					
	В	1,2					

Для функціонування математичної моделі нечіткого логічного висновку необхідно сформувати експертну базу знань нечітких правил, яка містить лінгвістичні правила залежності $Y = f(X)$. Базу знань можна представити у вигляді [102]:

$$(\delta_1 = \tilde{a}_{1j} \theta_j x_2 = \tilde{a}_{1j} \theta_j \dots \theta_j x_n = \tilde{a}_{nj}) \Rightarrow Y = d_j, j = 1, m, \quad (3.9)$$

де \tilde{a}_{ij} – нечіткий терм, яким оцінюється змінна x_i в j -тому правилі;

Θ_j – логічна операція, що пов’язує фрагменти j -ого правила;

m – кількість правил в базі.

База знань ключових нечітких правил представлена у вигляді таблиці 3.3:

Таблиця 3.3 – База знань нечітких правил

Входи				Вихід Y
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
ДМ	ДМ	Н	М	d ₁
ДМ	ДМ	0	Н	
М	ДМ	Н	М	
М	М	Н	М	d ₂
М	М	0	М	
С	С	Н	М	
М	ДМ	В	Б	
С	С	0	Н	d ₃
С	С	В	М	
С	М	В	Н	
С	В	Н	Н	
В	В	0	Н	d ₄
В	С	В	Б	
С	В	В	Б	
ДВ	ДВ	0	Б	d ₅
В	ДВ	В	Б	
В	В	В	Б	

Для отримання результатів моделювання складемо на основі експертної бази знань і термів функції належності базу нечітких логічних рівнянь, при цьому будемо використовувати операції « \wedge » (І – min) та « \vee » (АБО – max). Нечітке рівняння для виходів Y представимо у вигляді системи (5).

$$\begin{aligned}
\mu^{d1}(d) &= [\mu^{DM}(X_1) \cdot \mu^{DM}(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^M(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^{DM}(X_1) \cdot \mu^{DM}(X_2) \cdot \mu^0(X_3) \cdot \mu^H(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^M(X_1) \cdot \mu^{DM}(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^M(X_4)]; \\
\mu^{d2}(d) &= [\mu^M(X_1) \cdot \mu^M(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^M(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^M(X_1) \cdot \mu^M(X_2) \cdot \mu^0(X_3) \cdot \mu^M(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^C(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^M(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^M(X_1) \cdot \mu^{DM}(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4)]; \\
\mu^{d3}(d) &= [\mu^C(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^0(X_3) \cdot \mu^H(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^C(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^M(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^C(X_1) \cdot \mu^M(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^H(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^C(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^H(X_4)]; \\
\mu^{d4}(d) &= [\mu^B(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^0(X_3) \cdot \mu^H(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^B(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^C(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4)]; \\
\mu^{d5}(d) &= [\mu^{DB}(X_1) \cdot \mu^{DB}(X_2) \cdot \mu^0(X_3) \cdot \mu^B(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^B(X_1) \cdot \mu^{DB}(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4)] \vee \\
&\vee [\mu^B(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4)].
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Слід зазначити, що в рівняння не входять вагові коефіцієнти правил, оскільки для грубої настройки вони приймаються рівними одиниці. Маючи виміряні вхідні величини X , використовуючи розроблену модель (3.10), знаходимо нечітку множину \tilde{Y} , з якої після операції дефазифікації, за методом центра ваги, отримуємо значення напруги завдання для регулятора збудження ВЕУ. Використовуючи розроблену математичну модель, на базі контролера, що

володіє інструкціями для апаратної підтримки Fuzzy Logic (у нашому випадку – це Motorola M68HC11E [102]), реалізовано автоматичний регулятор для керування вітровою енергетичною установкою.

Моделювання розробленої системи рівнянь (3.10) з використанням компонент теорії нечітких множин здійснено в середовищі Matlab. Результати моделювання представлені на Рисунок 3.17-3.18.

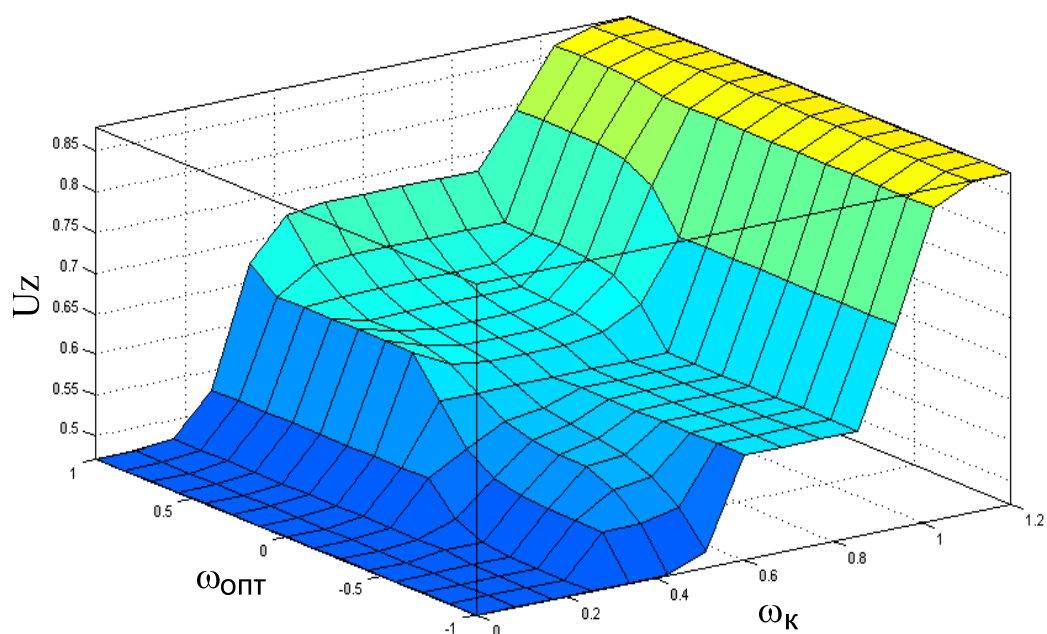


Рисунок 3.17. Залежність напруги завдання регулятора збудження U_z від поточної кутової швидкості обертання вітроколеса ω_k та значення його оптимальної швидкості ω_{opt}

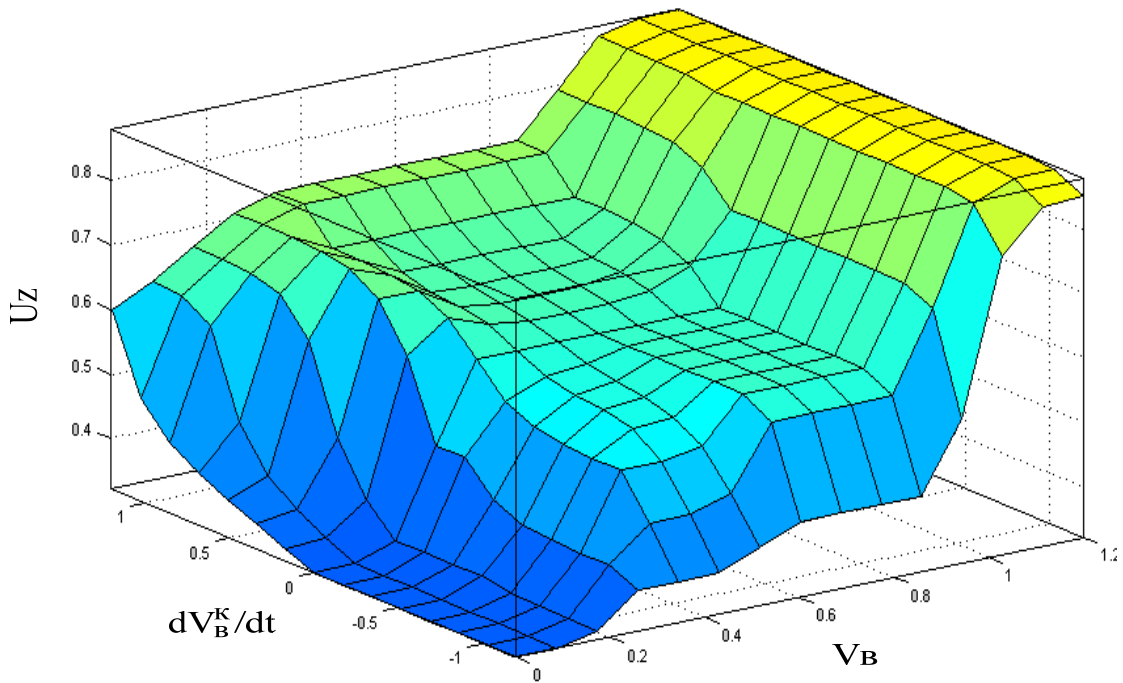


Рисунок 3.18. Залежність напруги завдання регулятора збудження U_z від швидкості вітру $V_{в}$ та похідної від ковзного значення швидкості вітру $dV_{в}^{\kappa}/dt$

Слід зазначити, що при достатньо високих відносних швидкостях вітру та ВК вплив погодних умов на різницю між швидкостями зменшується, крім того ВЕУ розвиває достатню потужність для ефективного використання її паралельно з мережею. В останньому випадку для спрощення алгоритму керування ВЕУ можна обмежитися робастним законом управління (2.46). А для надійної роботи системи керування ВЕУ у всьому можливому діапазоні зміни швидкостей вітру та ВК варто застосувати комбінацію чіткого та нечіткого законів у вигляді двох каналів керування регулятора, перемикання між якими здійснюватиметься у функції швидкості обертання ВК.

3.4 Застосування генетичних алгоритмів для врахування умов експлуатації ВЕУ

В підрозділі 3.3 на базі теорії нечітких множин було розроблено математичну модель і структуру регулятора швидкості обертання вітрового колеса. Для оптимізації роботи даної моделі і структури необхідно здійснити її настройку.

Найбільш поширений і сучасний для вирішення даної задачі є генетичний алгоритм, який ми і використовуємо.

Відсутність такої характерної особливості для класичних методів розв'язку задач оптимізації як наявність локальних екстремумів, а також компактність, що притаманна генетичним алгоритмам, є їх перевагою.

Як в загальному так і для системи керування ВЕУ зокрема, процедура пошуку оптимуму за допомогою генетичних алгоритмів базується на операціях схрещення, мутації і селекції та передбачає одночасний різносторонній пошук в заданому діапазоні значень.

В загальному структура класичного алгоритму складається із таких етапів [107]:

- 1) Ініціалізація чи вибір вихідної популяції хромосом;
- 2) Оцінка пристосованості хромосом в популяції;
- 3) Перевірка умови зупинки алгоритма;
- 4) Селекція хромосом;
- 5) Застосування генетичних операторів;
- 6) Формування нової популяції;
- 7) Вибір «найкращої» хромосоми.

Однією із операцій, яка є більш ранньою в схемі генетичного алгоритму, являється операція, яка полягає в формуванні структури хромосом шляхом кодування параметрів x_1 , x_2 , x_3 які оптимізуються. Для спрощення процедури перетворення бінарного коду в десятковий, слід вибрати позиційне двійкове кодування. [108, 109].

В умовах вирішення задачі керування ВЕУ структура хромосоми (Рисунок 3.9) формується з параметрів ФН $c_i^{m_i}$, $b_i^{m_i}$, термів a_{m_i} для кожної з змінних x_i що оптимізуються та ваг правил в нечіткій базі знань w_k (для кожного рядка).

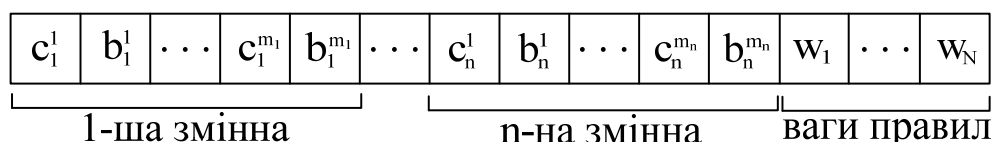


Рисунок 3.19. Структура хромосоми

Початкова популяція, яка складалась з десяти хромосом, формувалась випадковим чином в заданому інтервалі допустимих значень $[c_i, \bar{c}_i]$, $[b_i, \bar{b}_i]$, $[w_i, \bar{w}_i]$.

Згідно з [110, (5.23) – (5.25)] елементи хромосом можна задати так:

$$\begin{cases} c_i^0 = \text{Random}([c_i, \bar{c}_i]), \\ b_i^0 = \text{Random}([b_i, \bar{b}_i]), \\ w_i^0 = \text{Random}([w_i, \bar{w}_i]), \end{cases} \quad (3.11)$$

де $\text{Random}([c_i, \bar{c}_i])$ – означає операцію знаходження рівномірно розподіленого на інтервалі $[c_i, \bar{c}_i]$ випадкового числа; c_i – нижня границя інтервалу; \bar{c}_i – верхня границя інтервалу.

Процедура формування нової популяції була побудована на механізмі елітного відбору, який забезпечує швидкий пошук глобального оптимуму. Механізм елітного відбору передбачає відбір кращих хромосом з об'єму розширеної популяції, яка утворилася на базі попередньої після застосування генетичних операторів схрещування та мутації [111].

Критерієм оптимізації визначалась сума квадратів відхилень значень визначених нечіткою моделлю та даних з навчальної вибірки, отриманих в процесі дослідження реального об'єкта.

В результаті оптимізації запропонованої математичної моделі, яка здійснювалась за допомогою програми “ Gensearch” [113], отримано нові значення параметрів ФН (таблиця 3.5) та ваги правил нечіткої бази знань (таблиця 3.6).

Таблиця 3.5 – Параметри настройки ФН нечітких термів після настройки

Зм.	x ₁		x ₂		x ₃		x ₄				
	Т-ми	ФН		Т-ми	ФН		Т-ми	ФН			
		b	c		b	c		b	c	b	c
(ДМ)	0,1	0,139	(ДМ)	0.102	0.081						
(М)	0,379	0,146	(М)	0.4	0.146	(М)	-0.952	0.617	(М)	-0.878	0.249
(С)	0,6	0,182	(С)	0.249	0.8	(0)	0.218	0	(Н)	0.137	0
(В)	0,827	0,17	(В)	0.239	1.155	(В)	0.952	0.617	(Б)	0.488	0.735
(ДВ)	1,2	0,09	(ДВ)	0.055	1.185						

Таблиця 3.6 – Ваги правил нечіткої бази знань після настройки

Ваги правил w		Правила				Вихід Y
До оптимізації	Після оптимізації	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
1,00	0,975	ДМ	ДМ	Н	М	d ₁
1,00	1,00	ДМ	ДМ	0	Н	
1,00	0,951	М	ДМ	Н	М	
1,00	0,95	М	М	Н	М	d ₂
1,00	1,00	М	М	0	М	
1,00	1,00	С	С	Н	М	
1,00	0,97	М	ДМ	В	Б	

Продовження таблиці 3.6

1,00	1,00	С	С	0	Н	d ₃
1,00	1,00	С	С	В	М	
1,00	0,975	С	М	В	Н	
1,00	1,00	С	В	Н	Н	
1,00	1,00	В	В	0	Н	d ₄
1,00	0,975	В	С	В	Б	
1,00	1,00	С	В	В	Б	
1,00	0,975	ДВ	ДВ	0	Б	d ₅
1,00	0,95	В	ДВ	В	Б	
1,00	1,00	В	В	В	Б	

ФН нечітких термів такого параметра як «Відносне значення кутової швидкості обертання вітрового колеса» до застосування процедури оптимізації зображено на Рисунок 3.10, а на Рисунок 3.11 – відповідно після застосування процедури оптимізації.

Із отриманих графіків видно, що для ФН змінилися координати максимуму «b» та коефіцієнта розтягу «c». Отримані внаслідок цього результати відтворюють експертну оцінку.

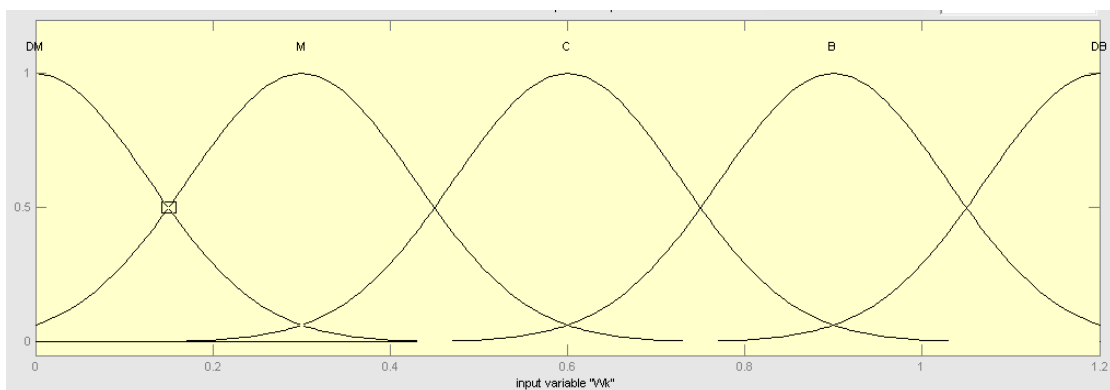


Рисунок 3.20. ФН термів для параметра «Відносне значення кутової швидкості обертання вітрового колеса» до застосування процедури оптимізації

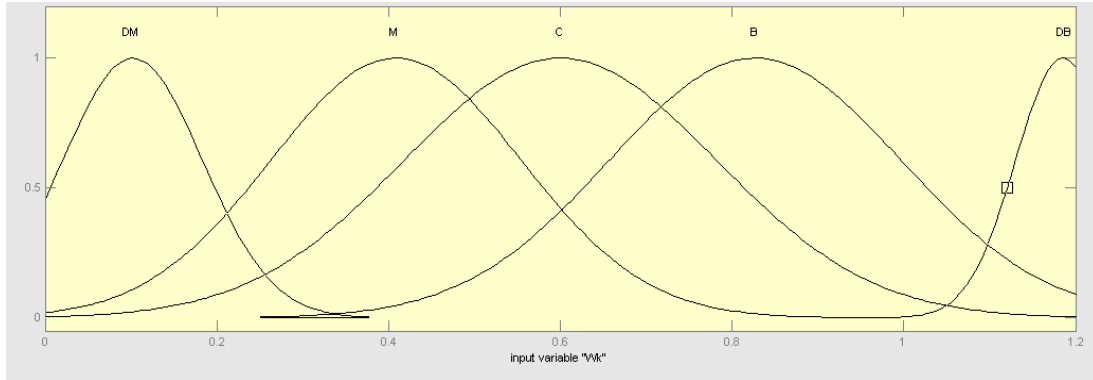


Рисунок 3.21. ФН термів для параметра «Відносне значення кутової швидкості обертання вітрового колеса» після застосування процедури оптимізації

Висновок:

Поведінка оптимізованої нечіткої моделі для системи керування вітровою енергетичною установкою досліджувалась в середовищі Matlab. Після навчання нечіткої моделі, похибка керування суттєво зменшується.

швидкостях достатньо високі показники якості регулювання має ПІ-закон регулювання.

Формування уставки (сигналу завдання) для регулятора напруги здійснюється з допомогою блоку формування уставки (БФУ), який виконує роль ключа.

Вхід керування ключем сполучається входом регулятора по каналу вимірювання швидкості обертання вітрового колеса. Інформаційні входи блоку формування уставки з'єднані, відповідно з виходами регулятора з нечіткою логікою та ПІ-регулятора.

Для структури системи автоматичного керування, представленої на рисунку 3.8, в якій пропонується використовувати і нечіткий і ПІ-регулятор, закон керування матиме такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\omega = \begin{cases} |\omega_{onm} - \omega(t)| - k_v \cdot V_\epsilon(t), \text{ якщо } \frac{dV_\epsilon^\kappa}{dt} < 0, \\ |\omega_{onm} - \omega(t)| + k_v \cdot V_\epsilon(t), \text{ якщо } \frac{dV_\epsilon^\kappa}{dt} > 0, \end{cases} \\ U_{зад}(t) = \begin{cases} k_\omega \cdot \Delta\omega + \int_0^{2T} \Delta\omega dt; \text{ якщо } \omega_\kappa > \omega_{кр}, \\ \text{fuzzy} \left(V_\epsilon, \frac{dV_\epsilon^\kappa}{dt}, \omega_\kappa, \omega_{onm} \right), \text{ якщо } \omega_\kappa \leq \omega_{кр}, \end{cases} \\ \Delta U = U_{зад}(t) - (U(t) - k_I I_u(t)), \\ I_{зб}(t) = \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt \right) \cdot k_{роб}. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Висновки:

Розроблено закон керування струмом збудження генератора ВЕК, а також структуру системи автоматичного керування, яка дозволяє працювати у точці максимального відбору потужності вітроколеса шляхом регулювання струму збудження генератора ВЕК, змінюючи в потрібному напрямку момент навантаження, ефективність використання вітрового потоку, для ВЕУ, що

розглядалася, збільшується до 25 % відносно її роботи при постійному навантаженні без впливу на момент обертання.

5 МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ

Сучасна техніка являє собою складні технічні системи, що реалізовані на базі мікроелектроніки та засобах обчислювальної техніки із використанням мікропроцесорів. Мікропроцесори являються найважливішою складовою побутової техніки, радіоелектронної апаратури і звичайно ж, різноманітних пристроїв промисловості різного призначення. Звичайно, що застосування використання таких складних пристроїв, як промислові роботи, не можливе без застосування мікропроцесорів [145].

Використання мікропроцесорів в системах керування і обробки інформації забезпечує виключно високі показники ефективності при низькій собівартості, так що мікропроцесорам практично нема альтернативної елементної бази для побудови якісних і дешевих систем. В багатьох застосуваннях система може складатися із одного мікроконтролера.

Такий широкий спектр застосування обчислювальної техніки багато в чому визначається появою у конструкторів доступних по ціні та мініатюрних за розмірами мікропроцесорів, які мають ряд технічних переваг: гнучкість настройки на різні алгоритми роботи, мала споживана потужність, висока надійність, можливість оперативного і швидкого перепрограмування на різні задачі, можливість збільшення функціональних можливостей, тощо.

Саме тому використання мікропроцесорів у галузі енергетики, та вітроенергетики зокрема, є виправданим і навіть, необхідним кроком. Так як це дозволяє обробляти значну кількість сигналів, що часто змінюються та керувати енергетичною установкою за заданими алгоритмами [117].

Виходячи із вище сказаного, потрібно розробити структуру мікропроцесорного пристрою, яка разом із алгоритмами керування, сенсорами, перетворювачами сигналів, програмним забезпеченням, дозволить створити мікропроцесорну систему керування вітровою енергетичною установкою.

На теперішній час найбільш поширеними є промислові мікроконтролери різних фірм, зокрема Intel, Atmel, Altera, Microchip, Motorola, Analog Devices, Texas Instruments, Siemens, Schneider Electric тощо [118 - 120].

Для вирішення багатьох задач апаратної частини, яка вбудована в мікроконтролер, вистачає, так як він містить мультиплексор, АЦП, компаратор, блоки пам'яті, тощо. Але якщо вбудованої апаратної частини не достатньо для вирішення поставленої задачі, то є можливість, використати додаткові зовнішні модулі розширення, що дозволить розширити функціональні можливості мікроконтролера [121 – 123].

В подальшому приділимо в основному увагу розробці алгоритмів роботи та програмного забезпечення, оскільки архітектура мікропроцесорів є стандартною.

5.1 Аналіз сенсорів інформативних параметрів регулятора ВЕК

Одним із важливих етапів практичної реалізації запропонованого регулятора струмом збудження ВЕК є вибір сенсорів інформативних параметрів, на основі яких здійснюється оптимальне керування. А саме сенсори напруги, струму, швидкості вітру та швидкості обертання вітрового колеса. Для цього необхідно звернути увагу на допустимі границі зміни даних величин.

Таблиця 5.1. – Граничні значення інформативних параметрів

Номінальне значення постійної напруги	$U_H=250 \text{ В}$
Номінальне значення струму навантаження	$I_H=5 \text{ А}$
Максимальне значення швидкості вітру	$v = 30 \text{ м/с}$
Максимальне значення частоти обертання	$n=240 \text{ об/хв}$

При виборі первинних вимірювальних перетворювачів струму та напруги слід враховувати, що дані величини є постійними-пульсуючими. Представимо порівняльну характеристику сенсорів струму та напруги.

Таблиця 5.2 – Порівняльна характеристика сенсорів струму та напруги

	Діапазон перетворення	Клас точності	Вихідний сигнал
Шунт 75 РИ	0 .. 7,5 А	1	0 .. 75 мВ
Сенсор струму на ефекті Холла LA 25-NP	0 .. 20 А	0,5	0 .. 5 В
Подільник напруги	0 .. 400 В	1,5	0 .. 0,15 В
Сенсор напруги на ефекті Холла LV 25-P	0 .. 500 В	1	0 .. 5 В

Аналізуючи наведені в таблиці 5.2 сенсори струму та напруги, слід виділити перетворювачі на основі ефекту Холла компанії LEM, що мають високі показники надійності та точності, малу похибку нелінійності, низький температурний дрейф, оптимальний час затримки, заводо захищеність, не високі масо-габаритні показники. Крім того сенсори на основі ефекту Холла дозволяють гальванічно розв'язати силові та вимірювальні кола [124, 125].

Основним критерієм вибору сенсорів швидкості вітрового потоку є висока точність та надійність. Такі первинні вимірювальні перетворювачі широко представлені на сучасному ринку вимірювальних систем. Порівняльна характеристика представлена в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Порівняльна характеристика сенсорів швидкості вітру

	Діапазон перетворення	Похибка	Вихідний сигнал
Fischer 451213	0,5 .. 30 м/с	0,2 м/с	Імпульсний
ДСВ1.13	0,3 .. 35 м/с	2 м/с	Імпульсний
ДВ-160	0.2 ... 60.0 м/с	2 м/с	Кодовий
LB-747	0.5 ... 90.0 м/с	2 м/с	Кодовий

Найбільш оптимальним варіантом є сенсор Fischer 451213, що забезпечує високу точність, низьку інерційність, високу чутливість, незалежність від кута нахилу при встановленні, високу надійність.

Серед сенсорів кутової швидкості найбільш ефективними є оптикоелектронні, що мають простоту конструкції та використання, широкий

діапазон вимірювання, високу точність (табл. 5.4). Виділяють три основні категорії таких сенсорів: з перериванням світлового потоку, з відбиванням та оптичні енкодери. Найпростішим варіантом є сенсори типу HOA1888 компанії Filur Electric з перериванням світлового потоку.

Таблиця 5.4 – Порівняльна характеристика сенсорів кутової швидкості

	Діапазон перетворення	Вібраційне прискорення	Похибка	Вихідний сигнал
Оптичний HOA1888	0 .. 10000 об/хв	200 м/с ²	0,5 °	Імпульсний
Оптичний ЛІР-158	0 .. 10000 об/хв	100 м/с ²	0,5 °	Імпульсний
Тахогенератор	0 .. 10000 об/хв	100 м/с ²	1,2 %	0 .. 5 В
Магнітний FP210L	0 .. 500 об/хв	100 м/с ²	0,5 °	Імпульсний

Здійснимо реалізацію пристрою керування струмом збудження ВЕУ на основі типового мікроконтролера, наприклад ATmega8535 фірми Atmel [127 – 130].

Основними технічними характеристиками мікроконтролера ATmega8535 є: висока продуктивність при малому споживанні енергії; розвинена RISC архітектура, 130-команд, більшість яких виконується за один машинний такт, 32x8 робочих регістра загального призначення, повністю статичний режим, до 16 MIPS продуктивність при 16 МГц, вбудований 2-х тактний помножувач; енергонезалежна пам'ять програм і пам'ять даних; 8К байт FLASH пам'яті програм з внутрісистемним само програмуванням; 100 000 циклів запису-стирання; завантажувальна область пам'яті з незалежними ключовими бітами, 512 байт EEPROM, 512 байт внутрішньої SRAM, програмуємий ключ доступу до програм і пам'яті даних. Перефірія: два 8-бітних таймера/лічильника, один 16-бітний таймер/лічильник з програмуємим пере дільником, режимом порівняння і захвата; лічильник реального часу з програмуємим генератором; чотири ШІМ генератора; байт орієнтований двопровідний інтерфейс; програмований послідовний USART, Master/Slave SPI;

вбудований аналоговий компаратор; програмуємий Watchdog із генераторами, що перемикаються. Спеціальні функції контролера: Reset при включені і понижені напруги живлення; зовнішні і внутрішні джерела переривання; внутрішній калібрований RC генератор; шість режимів енергозбереження. 40-выводний корпус PDIP, 44-выводний TQFP, 44-х PLCC, и 44-х MLF. 32 програмуємих входи-виходи; робоча напруга живлення 4.5 В до 5.5 В. Робоча тактова частота 16 МГц АТmega8535.

На Рисунок 5.2 приведена структурна схема мікропроцесорного пристрою керування струмом збудження ВЕУ, для роботи її в точці відбору максимальної потужності із стабілізацією вихідної напруги ВЕУ.

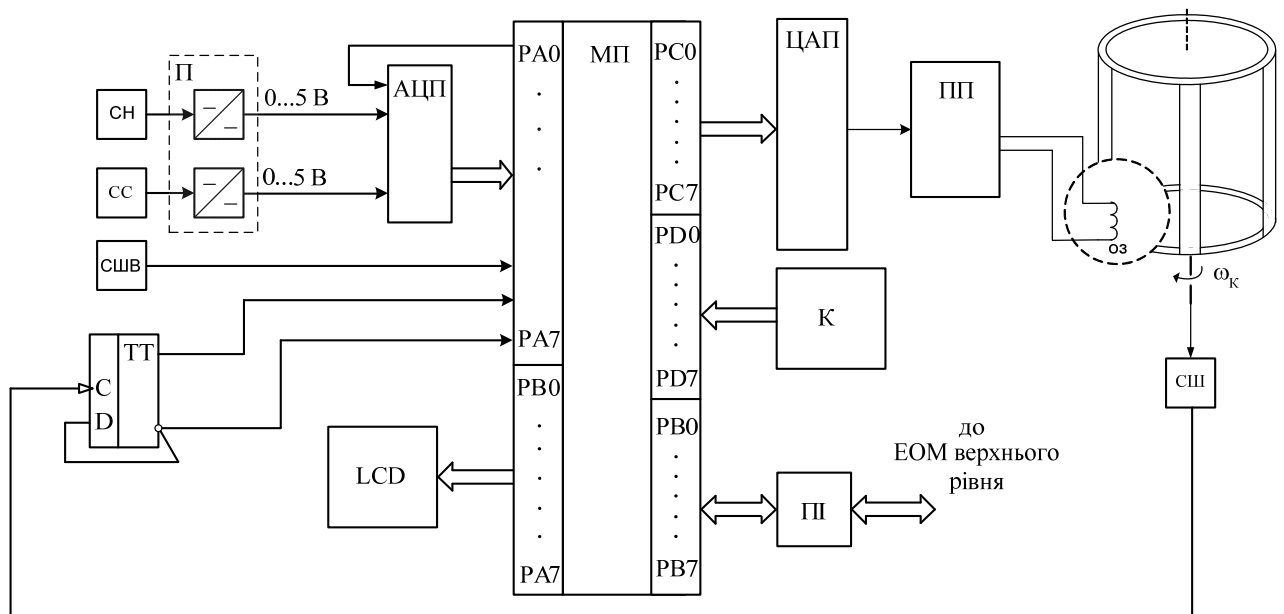


Рисунок 5.2. Структурна схема мікропроцесорного пристрою керування струмом збудження генератора ВЕК

На схемі: СШВ – сенсор швидкості вітру; СШ – сенсор кутової швидкості обертання ВК; СН – сенсор напруги на навантаженні; СС – сенсор струму навантаження; П – нормуючий перетворювач; МК – мікроконтролер; К – клавіатура; ПП – послідовний інтерфейс; ПП – каскадний підсилювач струму

збудження; ОЗ – обмотка збудження ВЕУ; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, ТТ – D - тригер.

Пристрій забезпечує вимірювання і аналіз параметрів роботи ВЕУ і на основі цього здійснює регулюючий вплив через каскадний підсилювач на обмотку збудження ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну. Пристрій забезпечує роботу для двох режимів – нечіткої та чіткої логіки, залежно від швидкості обертання вітрового колеса, що детально описано у розділі 3.

Сигнали з виходу сенсорів параметрів СН, СС, СШВ, СШ, які відповідають значенню швидкості вітру, кутової швидкості обертання ВК, значення напруги на виході ВЕУ та струму, що віддається в навантаження, подаються через перетворювач рівнів сигналів П, який приводить вхідні сигнали до рівня напруги, яка необхідна для нормальної роботи мікроконтролера МК, на відповідні входи РА0–РА7 8-канального АЦП. При цьому, сигнал від СШ поступає на вхід МК через D-тригер, який служить для того, що отримувати інформацію про швидкість при наявності імпульса від сенсора, так і під час паузи.

Мікроконтролер МК здійснює почергове підключення кожного вимірювального каналу і відпрацьовує отриманий сигнал згідно закладеного алгоритму.

Рідкокристалічний програмований індикатор LCD та клавіатура К дозволяє організувати обмін даними між мікроконтролером б та оператором для керування роботою пристрою. Перетворювач рівнів сигналів 8 забезпечує зв'язок мікроконтролера МК з ЕОМ верхнього рівня. Сигнали із виходів РС0–РС7 подаються на цифроаналоговий перетворювач ЦАП, із якого вихідний аналоговий сигнал поступає на каскадний підсилювач ПП, підсилений сигнал із підсилювача поступає на обмотку збудження ОЗ ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну.

З метою збільшення кількості вхідних параметрів в схему може бути введено зовнішній мультиплексор.

Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою системи керування ВЕК представлено на рисунку 5.3.

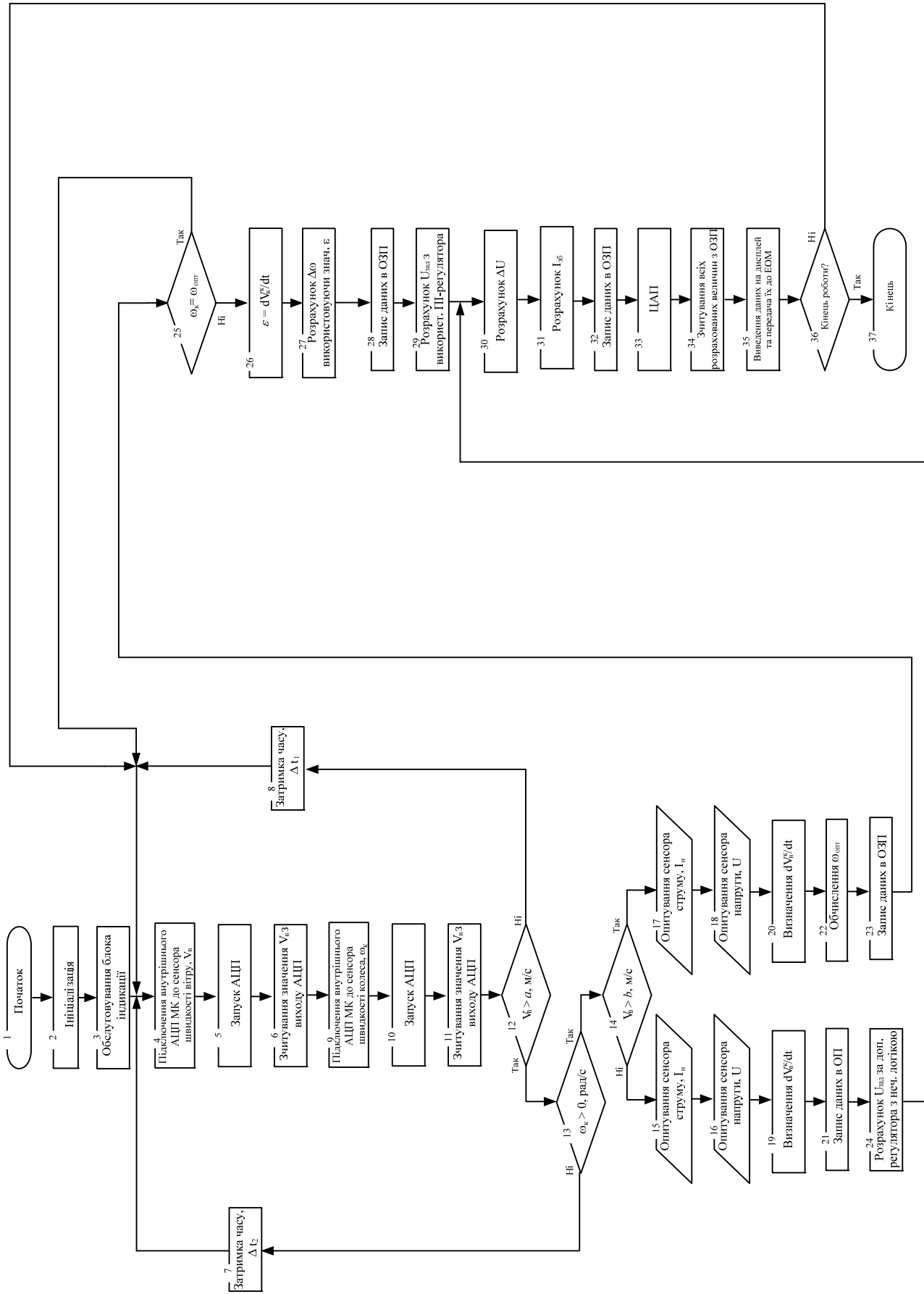


Рисунок 5.3. Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою системи

Алгоритм містить такі складові:

- В блоці 3 реалізовано обнуління вмісту пам'яті блока індикації та вивід на нього вихідних значень;
- В блоках 4, 5, 6 реалізовано зчитування інформації із сенсора швидкості вітру;
- Блоки 7, 8 забезпечують затримку в часі між опитуванням сенсорів швидкості вітру та кутової швидкості обертання ВК ВЕУ відповідно, що враховує реальний час між можливими змінами цих величин;
- В блоках 9, 10, 11 реалізовано зчитування інформації із сенсора кутової швидкості обертання ВК;
- В блоці 12 реалізовано перевірку відповідності реальної швидкості вітру мінімально можливому значенню швидкості вітру a , при якій ВК почне обертатися;
- В блоці 13 реалізовано перевірку відповідності наявності обертання ВК;
- В блоці 14 реалізовано перевірку відповідності реальної швидкості вітру певному заданому значенню швидкості вітру b , у випадку, якщо швидкість вітру більша чи рівна вказаного значення, то пристрій працюватиме по закону керування на основі чітких залежностей, якщо менша – на основі нечіткої логіки;
- Блоки 15, 16 реалізують зчитування інформації із виходу сенсору струму навантаження ВЕУ, що включає в себе підключення внутрішнього АЦП МК до сенсора струму, запуск АЦП, зчитування значення струму навантаження ВЕУ із виходу АЦП;
- Блоки 17, 18 реалізують зчитування інформації із виходу сенсору напруги ВЕУ, що включає в себе підключення внутрішнього АЦП МК до сенсора напруги, запуск АЦП, зчитування значення напруги ВЕУ із виходу АЦП;
- Блоки 19, 20 забезпечують програмне обчислення похідної ковзного середнього значення швидкості вітру;
- Блоки 21, 23, 28, 32 відповідають за запис вимірюваної на обчисленої інформації в оперативну пам'ять МК;

- Блок 22 здійснює обчислення оптимальної кутової швидкості обертання ВК, для відбору максимальної потужності згідно рівняння (2.47);
- В блоці 24 реалізовано обчислення задаючої напруги закону керування (3.1) на основі нечіткої логіки;
- В блоці 25 реалізовано перевірку відповідності поточної швидкості обертання вітрового колеса оптимальній, при якій відбувається відбір максимальної потужності від ВК.
- Блок 26 визначає знак похідної від ковзного середнього значення швидкості вітру;
- В блоці 27 реалізовано обчислення похибки регулювання по кутовій швидкості обертання, згідно закону керування;
- Блок 29 забезпечує обчислення напруги завдання із використанням ПІ-регулятора згідно закону керування;
- В блоці 30 реалізовано обчислення похибки регулювання по напрузі, згідно закону керування;
- В блоці 31 реалізовано обчислення значення струму збудження ВЕУ згідно закону керування;
- Блок 33 забезпечує перетворення цифрового коду у аналоговий сигнал;
- В блоці 34 проводиться зчитування усіх величин із оперативної пам'яті МК;
- Блок 35 забезпечує розпізнання, індикацію та передачу до ЕОМ вимірянних і обчислених величин.

Після відпрацювання повного циклу алгоритму роботи пристрою здійснюється перевірка необхідності запуску та завершення роботи в цілому.

Висновок: розроблено структуру мікропроцесорного пристрою, яка разом із алгоритмами керування, сенсорами, перетворювачами сигналів, програмним забезпеченням, дозволить створити мікропроцесорну систему керування вітровим електротехнічним комплексом.

6 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ НА СТІЙКІСТЬ

Запропонована структура системи керування ВЕУ суттєво нелінійна і викликана з однієї сторони дискретністю визначення методу формування регулюючого впливу на об'єкт, а з іншої нелінійністю характеристик вітрового колеса та електромеханічного перетворювача енергії.

Комп'ютерне моделювання і дослідження стійкості системи проведено в середовищі Matlab [133, 134]. Даний ППП дає можливість вирішувати широке коло математичних задач і містить в своєму складі програму Simulink [135], з допомогою якої можна легко будувати схеми моделювання досліджуваних систем і отримувати результати моделювання в зручному наочному вигляді.

Застосування моделі дозволить швидко провести пошук оптимальних параметрів налагодження регулятора на роботу з ВЕУ різної потужності (де слід визначити межі струмової компенсації в законі регулювання), різних рівнів напруг, з змінними вимогами щодо режиму мережі за потужністю.

Розроблена модель системи керування представлена на Рисунок 6.4. Система складається з автоматичного регулятора *Voltage regulator*, що керує струмом збудження електромеханічного перетворювача *Generator*. Завдання швидкості вітру в моделі формується блоком константи *Wind speed* (як показано на Рисунок 6.4), або відповідно, блоком білого шуму *Band Limited White Noise* з зазначеним середньоквадратичним відхиленням та кроком дискретизації з бібліотеки *Sources*.

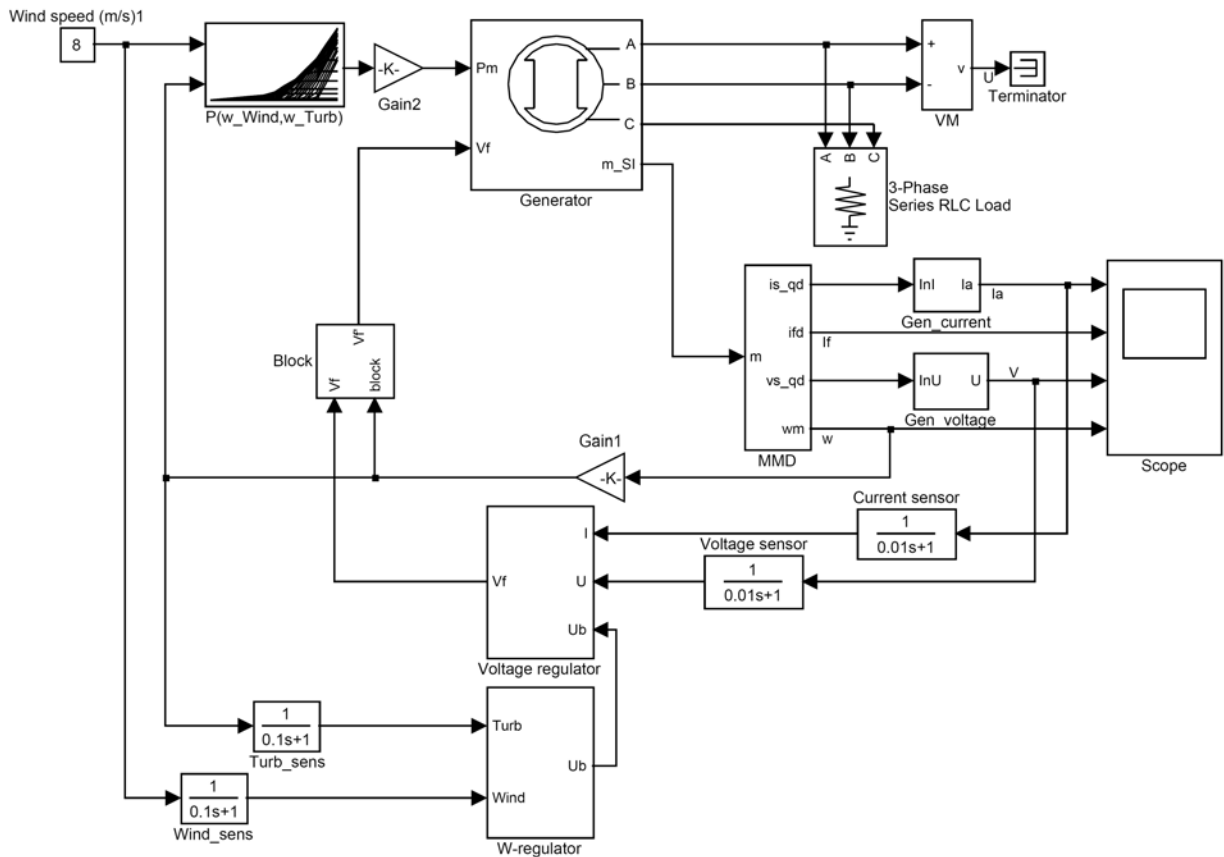


Рисунок 6.4. Модель системи автоматичного керування ВЕК

Характеристика вітрової турбіни формується в командному вікні *Matlab* з допомогою створеної у робочій області *Workspace* бази даних *psbwindgen*, яку потрібно ініціалізувати окремо. Вказана залежність у формі масиву має графічну інтерпретацію у вигляді поверхні (Рисунок 6.5).

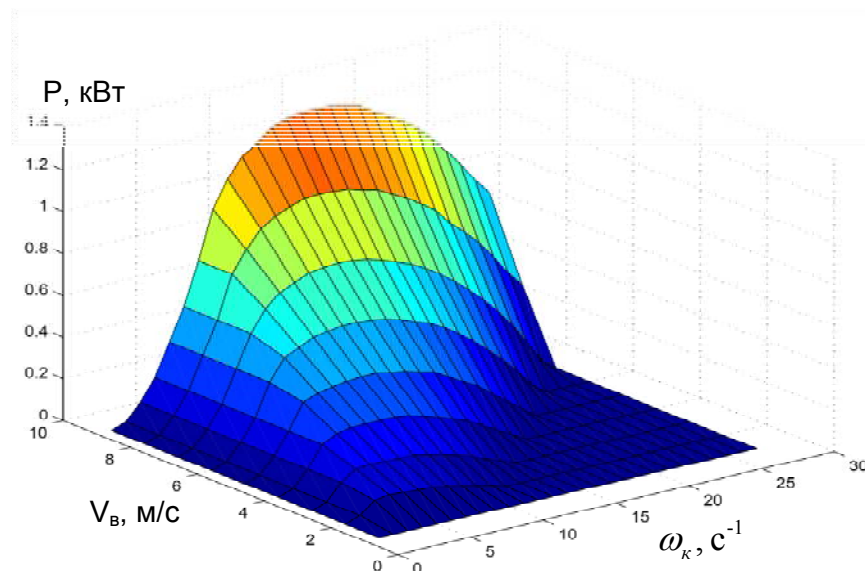


Рисунок 6.5. Характеристика вітрового колеса ВЕУ

Характеристику вітрової турбіни у створеній моделі задаємо з допомогою інструменту роботи з табличними даними *Look-Up Table 2D* та ідентифікуємо для неї активовану робочу область *Workspace (Update diagram)*. Вікно параметрів цього блоку приведено на Рисунок 6.6, в нижній частині вводиться ім'я сектору робочої області *psbwindgen_char*, що містить дані характеристики турбіни.

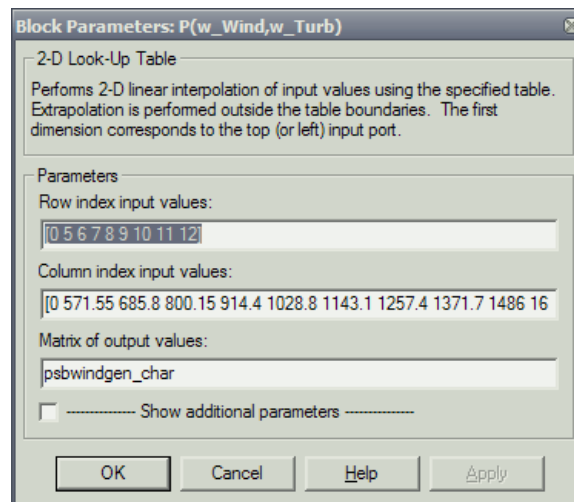


Рисунок 6.6. Вікно параметрів блоку завдання характеристики турбіни

Приведення потужності вітрового колеса до валу електромашинного перетворювача в моделі проводиться через підсилювач *Gain2*, призначений для переводу одиниць вимірювання потужності (кВт \rightarrow Вт), оскільки на вхідний порт моделі машини *Generator* подається сигнал, відповідний потужності у Вт. [136].

У вікні параметрів перетворювача вводяться розраховані з допомогою викладеної вище методики параметри схеми заміщення синхронної машини з приведенням до поздовжньої d та поперечної q осей машини. Вікно параметрів машини, яка використовується в моделі, приведене на Рисунок 6.7.

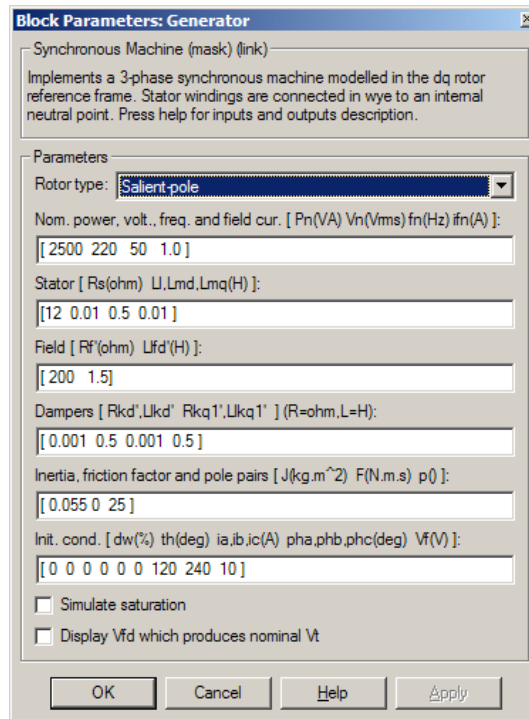


Рисунок 6.7. Вікно параметрів моделі електромеханічного перетворювача

Моделювання навантаження здійснюється з використанням блоку *RLC Series Load* бібліотеки *SimPowerSystem*, як показано на Рисунок 6.4, але для моделювання змінного навантаження в подальшому використовувався блок динамічного навантаження *3-Phase Dynamic Load* з тієї ж бібліотеки.

Вимірювальні канали пристрою для автоматичного керуванням збудженням ВЕУ формуються з допомогою сенсорів відповідних параметрів, що реалізовані в розробленій моделі на базі аперіодичних ланок *Turb_sens* (сенсор швидкості обертання турбіни), *Wind_sens* (сенсор швидкості вітру), *Current sensor* та *Voltage sensor* (відповідно, сенсори струму та напруги перетворювача). Для моніторингу стану перетворювача, як основного пристрою, використовується блок MMD, що призначений для виділення з обчислювальної області параметрів машини необхідних в процесі дослідження величин, а саме: струму та напруги обмоток статора, кута електромагнітного навантаження, швидкості обертання, струму збудження.

Визначення діючих значень струмів та напруг перетворювача відбувається з допомогою додаткових блоків *Gen_current* та *Gen_voltage*,

структура одного з них приведена на Рисунок 6.8. Принцип обчислення: визначення середньоквадратичного значення між поздовжньою та поперечною складовими відповідного параметру, що формується на вихідному порті блоку MMD у вигляді вектору значень.

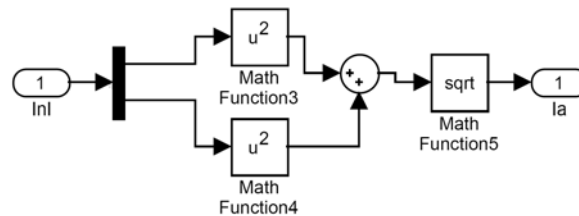


Рисунок 6.8. Будова моделі визначення діючого значення струму *Current measurement*

При незмінному моменті на валу вітрової турбіни формування регулюючого впливу системи направлене на стабілізацію напруги на виході перетворювача. Для цього перетворювач охоплений зворотнім зв'язком за напругою та струмом навантаження. Обидва сигнали від відповідних сенсорів поступають на входи регулятора напруги *Voltage Regulator*, внутрішня структура якого представлена на Рисунок 6.9.

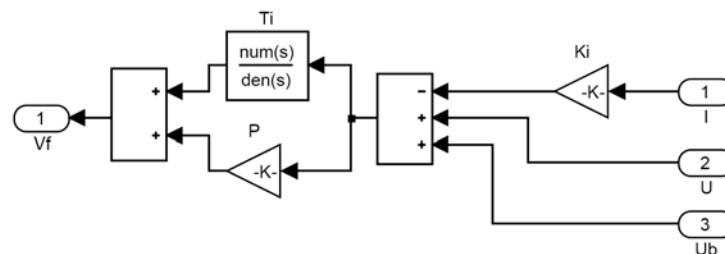


Рисунок 6.9. Будова моделі регулятора напруги

В блоках P та Ti задаються параметри регулятора напруги, значення яких знаходяться в результаті пошуку оптимальних значень з допомогою бібліотеки інструментів *Nonlinear Control Design (NCD Toolbox)*. Порядок використання

порту оптимізації *NCDoutport* для пошуку коефіцієнту підсилення регулятора напруги та постійної часу інтегрування описаний в [137].

Головний регулятор системи керування ВЕУ представлений як регулятор формування сигналу опорної напруги для внутрішнього (підпорядкованого) контуру регулювання струму збудження у функції ряду змінних, а саме: швидкості вітру та похідної ковзного середнього швидкості вітру, швидкості обертання вітрової турбіни. Структура регулятора представлена на Рисунок 6.10.

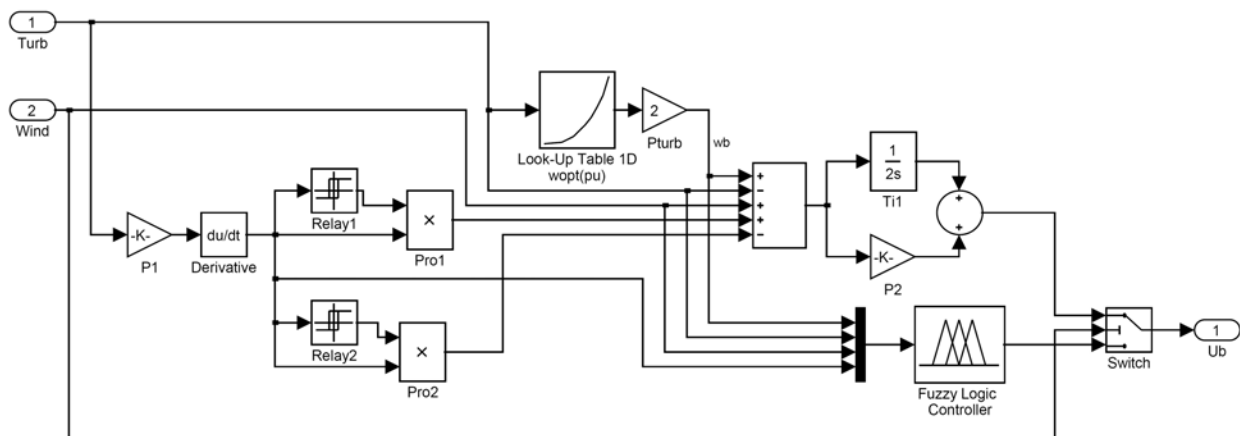


Рисунок 6.10. Модель головного регулятора *W-regulator* системи керування

Визначення оптимального значення швидкості турбіни при існуючій швидкості вітру здійснюється з допомогою блоку *Look-Up Table 1D (wopt pu)*, у вікні властивостей якого вносяться дані по максимальній потужності на валу вітрової турбіни для відповідної швидкості вітрового потоку. Вікно властивостей вказаного блоку представлено на Рисунок 6.11.

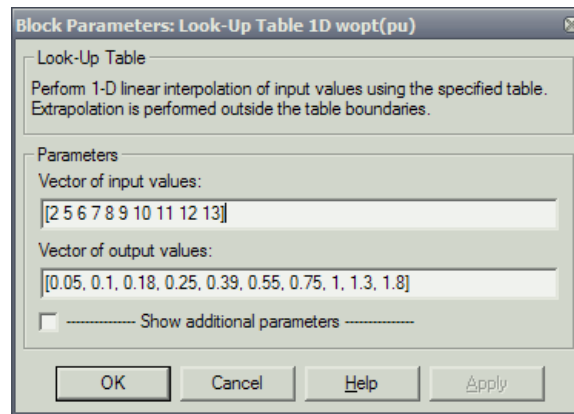


Рисунок 6.11. Вікно властивостей блоку визначення оптимальної швидкості обертання колеса

Оскільки обчислений вектор вихідних значень оптимальної швидкості обертання вітрової турбіни при існуючій швидкості вітру для формування максимальної потужності на валу турбіни вводиться у вищеназваному блоці у відносних одиницях, то в блоці P_{turb} задається коефіцієнт переведу відносних значень вектору в величину кутової швидкості обертання.

Регулюючий вплив визначається двома шляхами: з допомогою П-регулятора, реалізованого блоками T1 та P2 (параметри визначаються з допомогою інструменту оптимізації $NCDoutport$) та нечіткого регулятора $Fuzzy Logic Controller$. Блок нечіткого регулятора пов'язується з файлом нечіткої логічної структури типу *.fis, який попередньо активується в робочій області $Workspace$ командного вікна $Matlab$. Вікно параметрів нечіткої структури $fuzzy$ -регулятора приведено на Рисунок 6.12.

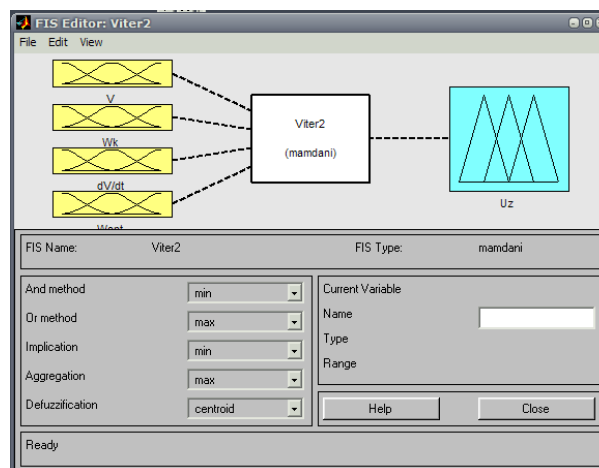


Рисунок 6.12. Вікно параметрів нечіткої логічної структури $Viter2.fis$, пов'язаного з блоком $Fuzzy Logic Controller$

База прийняття нечіткого логічного висновку для створеної структури представлена на Рисунок 6.13, а її розробка детально описана в розділі 3 роботи.

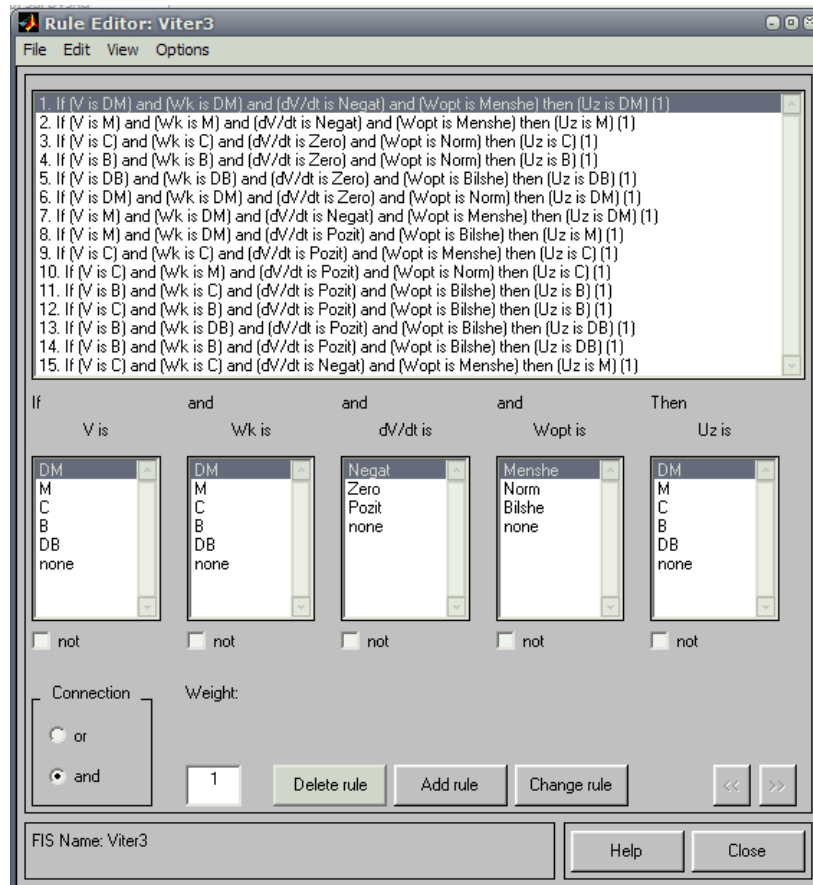


Рисунок 6.13. Правила нечіткого логічного висновку блоку *Fuzzy Logic Controller*

Для передачі сигналу керування на вихід головного регулятора від ПІ-регулятора чи від блоку *Fuzzy Logic Controller* призначений комутатор *Switch*, порт керування якого (порт 2) з'єднується з входом головного регулятора по швидкості обертання вітрового колеса. Вікно властивостей цього блоку приведено на Рисунок 6.14.

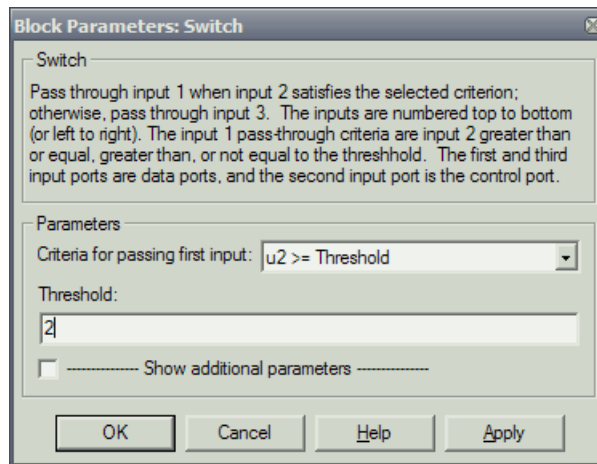


Рисунок 6.14. Вікно властивостей блоку *Switch*

В структурі системи керування окремим блоком виділено елемент блокування збудження при максимальній (ураганній) швидкості вітру для запобігання пошкоджень перетворювача та обладнання, пов'язаного з ним. Структура цього елемента, реалізована в комп'ютерній моделі системи керування ВЕУ показана на Рисунок 6.15.

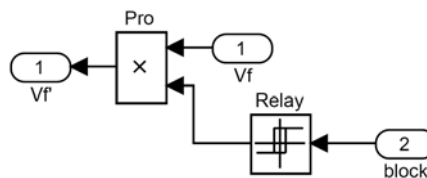


Рисунок 6.15. Структура блоку обмеження збудження при високих швидкостях вітру

Значення гранично допустимої швидкості вітру вводиться як межа спрацювання релейного елемента Relay, а стан його вихідного порту – початковий – 1, увімкнений – 0.

Результати моделювання системи керування ВЕУ приведено на Рисунок 6.16 – 6.18.

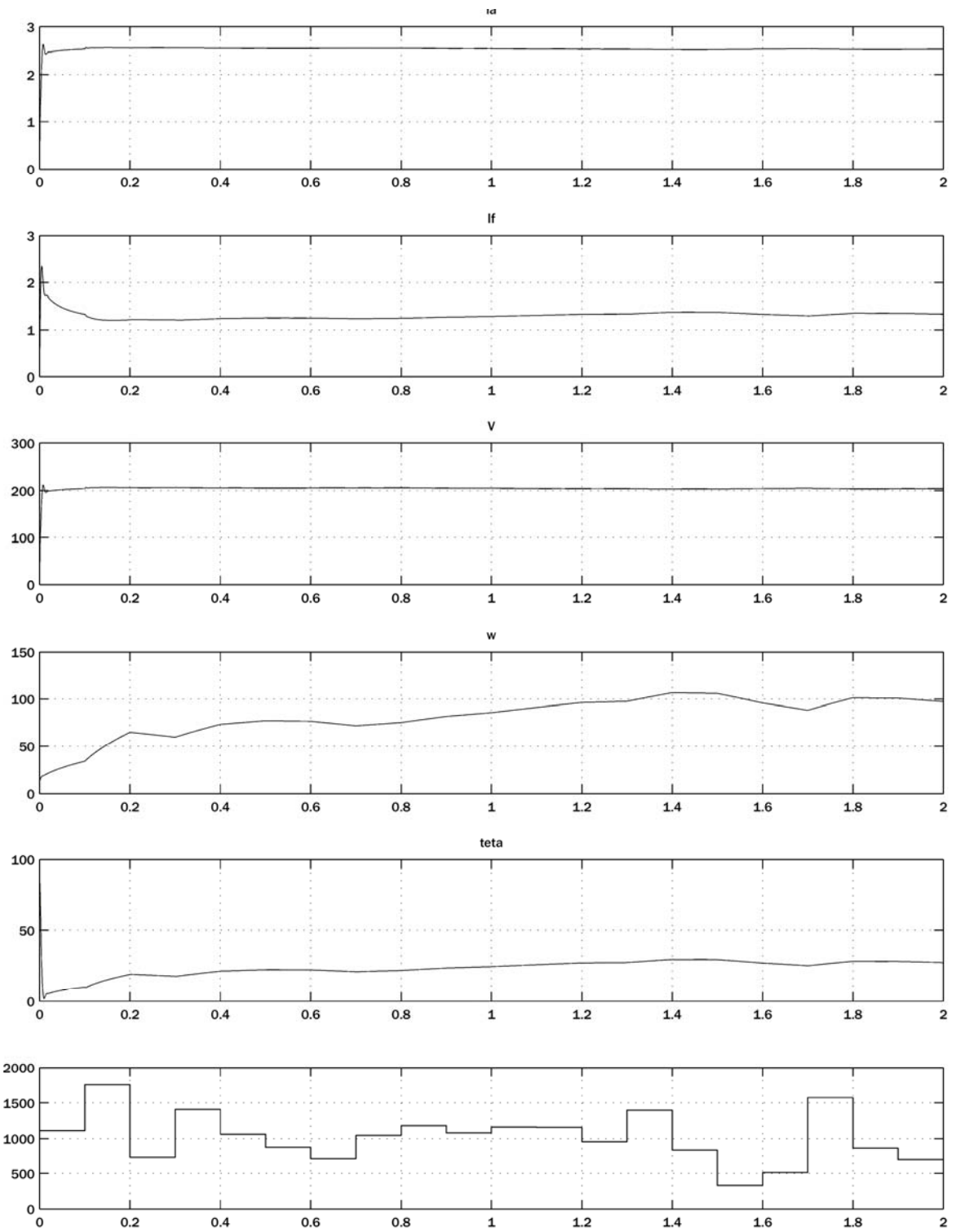


Рисунок 6.16. Перехідні процеси ВЕУ при збуреннях з боку навантаження

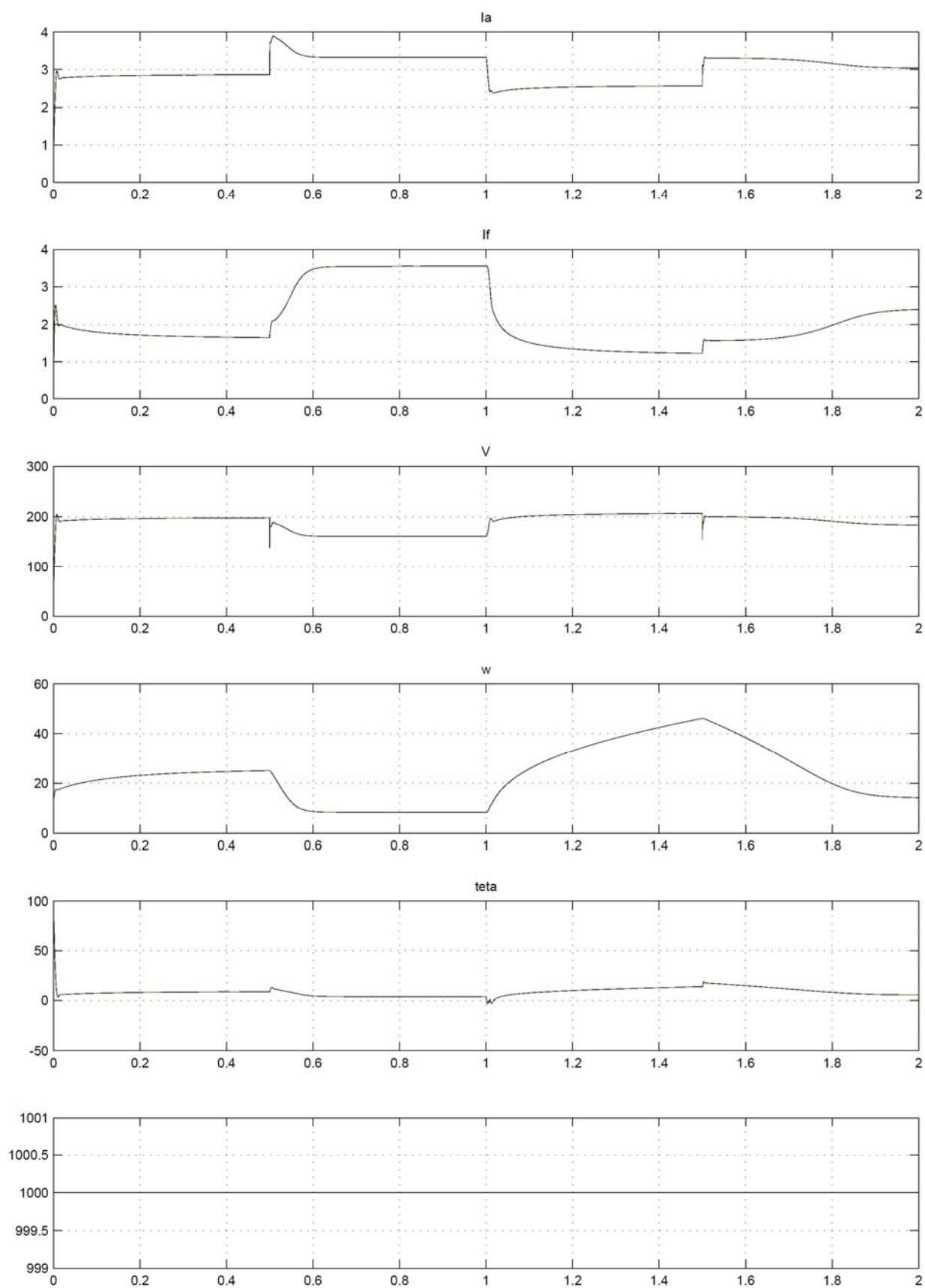


Рисунок 6.17. Перехідні процеси ВЕК при збуреннях з боку вітру

Висновок.

1. Створено модель системи керування ВЕК відповідно до її складу у середовищі Matlab Simulink, яка дозволяє визначати параметри настройки регуляторів в системі керування.

2. Проведено дослідження роботи системи автоматичного керування ВЕК з використанням комп'ютерного моделювання при збуреннях з боку вітрового потоку та навантаження.

7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Вимоги, які пред'являються до автономних систем ЕП, включно із вітроенергетичними установками, умовно можна поділити на дві групи:

- загальні вимоги, що задаються технологічним процесом (діапазон швидкості, статична і динамічна точності її підтримки, межі зміни моменту і прискорення, смуга пропускання частот, граничний час регулювання і т.д).

- спеціальні вимоги, які визначаються техніко-економічними особливостями самих пристроїв (масогабаритні і вартісні показники, енергетичні характеристики, надійність і інші техніко-економічні показники).

Серед техніко-економічних вимог, що пред'являються до електротехнічного комплексу ВЕУ, необхідно виділити наступні:

- високі значення потужності і моменту на валу виконавчого двигуна при мінімальних масі і габаритах;

- висока ремонтпридатність;

- мала енергоємність;

- уніфікація вузлів і елементів;

- економічність і низька вартість.

Оскільки повне поєднання всіх вимог в одному пристрої практично неможливо, тому при розробці конкретної ВЕУ врахування одних вимог досягається за рахунок нехтування інших. Технічні вимоги ВЕУ підтверджують необхідність побудови високодинамічних систем:

- діапазон потужностей виконавчого електродвигуна 0,1-30кВт;

- діапазон зміни швидкості в межах до 50: 1 - 1000: 1;

- смуга пропускання частот 30-1000 Гц;

- короткочасне перевантаження по моменту кратністю до 2,5-3,0 і вище.

Визначення економічної ефективності ВЕУ багато в чому залежить від кількості виробленої електроенергії в електростанціях [114]. Ефективність роботи електростанції оцінюється коефіцієнтом використання встановленої потужності. Це відношення фактичної річного виробітку генерованої

електроенергії в даній електростанції (в нашому випадку ВЕУ) до максимально можливого виробітку енергії в залежності від енергоресурсу.

В сучасних ВЕУ, підключених до єдиної електричної системи, коефіцієнт використання встановленої потужності становить від 0,15 до 0,30. Коефіцієнт використання встановленої потужності ВЕУ залежить від наступних факторів [112]:

- частий ремонт електростанції;
- графік навантаження споживаної потужності протягом доби;
- наявність вітру і її максимальна потужність протягом всього часу експлуатації.

7.1 Визначення капітальних вкладень

Ціна кожного із елементів електротехнічного комплексу, а також і їх загальна вартість представлені в таблиці 7.1.

Розрахунок вітрогенератора здійснюється в розрахунку на його номінальну потужність 2 кВт та із врахуванням більш ефективного використання енергії вітру в конструкції ВЕУ за рахунок застосування замість планетарного механічного редуктора нової конструкції – магнітного редуктора, що дозволить підвищити коефіцієнт використання встановленої потужності.

Таблиця 7.1 – Кошторис капіталовкладень

Елементи електротехнічного комплексу	Ціна, грн.
Синхронний генератор ГС-2	6160,00
Конструкція ВЕУ, встановлення	4500,00
Перетворювач частоти (мережевий інвертор)	18765,00
AGM аккумулятори EverExceed DP-12200 (1 шт. – 2,4 кВт)	14200,00
Контролер WWS100A	4540,00
Додаткові пристрої системи ВЕУ, периферійні пристрої, комутаційні апарати	2300,00
Кабель силовий 4 мм (80м.)	940,00
Загальна вартість	51405
Транспортні витрати та монтажні витрати (13%)	6682,65
Витрати на будівельні роботи (10%)	5140,5
Капітальні витрати (інвестиції)	63228,15

Для визначення капітальних вкладень потрібно до загальної вартості обладнання додати також і вартість його доставки, монтаж цього обладнання та витрати на будівництво. А також потрібно розрахувати амортизаційні відрахування.

Вартість доставки обладнання розраховуються в залежності від відстані, маси вантажу та тарифу залізничного перевезення на відстань одного кілометра тони вантажу. Монтажні роботи розраховуються відповідно до нормативів вартості монтажних робіт. Спрощуючи розрахунок, вартість доставки та монтажних робіт, можна прийняти рівними 13% від загальної вартості обладнання:

$$C_{\text{дм}} = C_{\Sigma} \cdot 0,13 \text{ (грн.)} \quad (7.1)$$

$$C_{\text{дм}} = 51405 \cdot 0,13 = 6682,7 \text{ (грн.)}$$

Витрати на будівельні роботи (влаштування фундаментів) розраховують виходячи із нормативів витрат на будівництво. Даний норматив для укрупнення розрахунку приймається рівним 10% від вартості обладнання:

$$C_B = C_{\Sigma} \cdot 0,1 \text{ (грн.)} \quad (7.2)$$

$$C_B = 51405 \cdot 0,1 = 5140,5 \text{ (грн.)}$$

Амортизаційні відрахування знаходяться із добутку норми амортизації на первісну вартість об'єкту основних фондів:

$$A_p = \frac{C_{\Sigma} \cdot H_A}{100\%}, \quad (7.3)$$

де H_a – норма амортизації (при умові, що термін експлуатації ВЕУ приймемо за 20 років норма амортизації буде рівною 5%)

$$A_p = \frac{76389,15 \cdot 5\%}{100\%} = 3820 \text{ (грн.)}$$

7.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Відповідно до правил улаштування електроустановок обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого, а група допуску по електробезпеці не нижче третьої. Приймаємо, що ВЕУ обслуговує працівник із п'ятим розрядом, оскільки обслуговування такого пристрою потребує вищого рівня професіоналізму та знання комп'ютерних технологій обміну даними та налаштування мікропроцесорних пристроїв.

Розрахунок витрат на заробітну плату обслуговуючого персоналу виконується за наступною формулою:

$$C_3 = C_{30} + C_{3д}, \quad (7.4)$$

де C_{30} – основна заробітна плата по тарифу;

$C_{3д}$ – додаткова заробітна плата.

$$C_{30} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_C \cdot \beta, \quad (7.5)$$

де N – кількість робітників які обслуговують ВЕУ ($N = 1$ чол.);

T_1 – годинна тарифна ставка робітника першого розряду ($T_1 = 22$ грн.);

K – тарифний коефіцієнт (для робітника 4-го розряду: $K = 2,33$, див. таблицю 4.2);

K_C – коефіцієнт співвідношень, що встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ($K_C = 1$);

β – відношення часу, затраченого робітником, на обслуговування установки відносно загального часу своєї роботи ($\beta = 1$);

$\Phi_{\text{еф}}$ – ефективний фонд часу обслуговування вітроенергетичної установки:

$$\Phi_{\text{еф}} = \varepsilon \cdot Z_{\text{РД}} \cdot Z_{\text{РЗ}} \cdot t_{\text{РЗ}}, \quad (7.6)$$

де ε – відносна тривалість увімкнення ($\varepsilon = 0.5$);

$Z_{\text{РД}}$ – кількість робочих днів за рік ($Z_{\text{РД}} = 220$ днів/рік);

$Z_{\text{РЗ}}$ – кількість робочих змін ($Z_{\text{РЗ}} = 1$);

$t_{\text{РЗ}}$ – тривалість робочої зміни ($t_{\text{РЗ}} = 1$).

Розраховуємо ефективний фонд часу обслуговування ВЕУ та основну заробітну плату по тарифу:

$$\Phi_{\text{еф}} = 0,5 \cdot 250 \cdot 1 \cdot 1 = 110 \text{ (год./ рік)}.$$

$$C_{30} = 1 \cdot 22 \cdot 2,03 \cdot 110 \cdot 1 \cdot 1 = 4912,6 \text{ (грн.)}.$$

Таблиця 7.2 – Тарифна сітка працівників

Тарифні розряди	I	II	III	IV	V	VI
Тарифні коефіцієнти	1	1,5	1,8	2,03	2,33	2,7

Додаткова заробітна плата (премія) становить 10% від розміру основної заробітної плати і відповідно становить:

$$C_{зд} = 49126 \cdot 0,1 = 491 (\text{грн}).$$

В цілому загальні витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу системи КАСЕП становитимуть:

$$C_3 = 4912,6 + 491 = 5403,6 (\text{грн}).$$

7.3 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

Поточний ремонт електроустаткування проводиться на місці його встановлення із відключенням і зупинкою ремонтним персоналом.

Грошові витрати для проведення ремонтних робіт містять в собі витрати на комплектуючі, запасні частини та інші елементи, що потребують заміни, а також витрати на оплату праці працівників, що проводять ремонтні роботи. Графік планових попереджувальних ремонтних робіт представлено в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Графік планових ремонтних робіт

Найменування обладнання	Види ремонтних робіт по місяцях												Трудовіст-ть, люд-год.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Вітрогенератор				4				4				4	12
Система керування (ПЧ)				3				3				3	9
Контролер заряду і АКБ			3				3				4		10
Кабельна мережа			2				2				2		6
Механічна конструкція ВЕУ				2				2				2	6
	Загальна трудовісткість												42

Приймаємо, що виконання даних ремонтних, відновлювальних та налагоджувальних робіт проводитиметься електромонтером шостого розряду. Відповідно до того, що є відомими кількість годин виділених на проведення ремонтних робіт основна заробітна плата працівника знаходитиметься із наступної формули:

$$C_{зоп} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{ефр}} (\text{грн}), \quad (7.7)$$

$$C_{\text{ЗОР}} = 22 \cdot 2,03 \cdot 42 = 1876 \text{ (грн.)}$$

Величина додаткової заробітної плати ремонтного персоналу становить 20%, визначається високим рівнем кваліфікації працівника, який має в разі потреби ремонтувати декілька самодостатніх електромеханічних пристроїв (ВЕУ, систему керування ПЧ ВЕУ),:

$$C_{\text{ЗДР}} = C_{\text{ЗОР}} \cdot 0,2 \text{ (грн.)}, \quad (7.8)$$

$$C_{\text{ЗДР}} = 1876 \cdot 0,2 = 375 \text{ (грн.)}$$

Відповідно витрати на оплату праці ремонтного персоналу складатимуть:

$$C_{\text{ЗР}} = C_{\text{ЗОР}} + C_{\text{ЗДР}} \text{ (грн.)}, \quad (7.9)$$

$$C_{\text{ЗР}} = 1876 + 375 = 2251 \text{ (грн.)}$$

Витрати на комплектуючі, запасні частини та інші елементи розраховуються відносно основної заробітної плати ремонтного персоналу, і становлять 15 % від її величини.

$$C_{\text{К}} = C_{\text{ЗОР}} \cdot 0,15 \text{ (грн.)}, \quad (7.10)$$

$$C_{\text{К}} = 1876 \cdot 0,15 = 281 \text{ (грн.)}$$

Величина загальних річних експлуатаційних витрат розраховується наступним чином:

$$C_{\text{В}} = A_{\text{Р}} + C_{\text{З}} + C_{\text{ЗР}} + C_{\text{К}} \text{ (грн.)}, \quad (7.11)$$

$$C_{\text{В}} = 3161,4 + 5403,6 + 2251 + 281 = 11097 \text{ (грн.)}$$

7.4 Розрахунок терміну окупності електротехнічного комплексу ВЕУ

Виріток електричної енергії ВЕУ (2 кВт). Розрахуємо кількість електроенергії, що виробить ВЕУ за один рік

$$W_{\text{річн.}} = S_{\text{об}} \cdot C_{\text{Р}} \cdot P_{\text{ППВ}} \cdot K_{\text{МР}}, \quad (7.12)$$

де C_p – розрахунковий коефіцієнт потужності вітроколеса (ВЕУ 2 кВт) з горизонтальною віссю обертання в робочій точці (приймаємо рівним $C_p = 0,456$);

$S_{об}$ – площа обертання лопатей, яку охоплює вітроколесо при обертанні (згідно існуючих розрахунків для вітроколеса $S_{об} = 14,5$).

$P_{п.п.в.}$ – природний потенціал вітру Вінницької області на висоті 15 метрів ($P_{п.п.в.} = 1120$ (кВт·год/м²)/рік).

K_{MP} – коефіцієнт підвищення використання потенціалу вітру за рахунок застосування магнітного редуктора в конструкції ВЕУ.

Використання МР замість механічного редуктора не тільки зменшує масогабаритні розміри ВЕУ, але і підвищує надійність і термін служби ВЕУ, забезпечується регулювання швидкості обертання швидкохідного валу МР із врахуванням моментів інерції на валах та моментів навантаження, прикладених на ВГ у вигляді навантаження. Крім того, забезпечується рекуперація надлишкової енергії зі статора МР через ПЧ під час збільшення швидкості обертання ВК від заданого максимального діапазону обертання.

Приймаємо значення K_{MP} в розрахунках рівним 1,3.

$$W_{річн.} = 14,5 \cdot 1120 \cdot 0,456 \cdot 1,2 = 8886,5 \text{ (кВт} \cdot \text{год)}.$$

Згідно [Закону України "Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії" № 514](#) НКРЕКП ввела у дію нові "зелені" тарифи на електроенергію для приватних господарств, залежно від дати вводу в експлуатацію. Відповідно до «Зеленого» тарифу для вітрових електростанцій вартість 1 кВт·год виробленої електричної енергії складає 3,08 гривні (відповідно до Закону №514 – 11,6 євроцентів/кВт·год). Тобто за рік сума складе:

$$C_{P_{веу}} = 3,08 \cdot W_{річн.} \quad (7.13)$$

$$Ц_{P_{веу}} = 3,08 \cdot 8886,5 = 27370,5 \text{ (грн.)}.$$

Термін окупності розраховуємо за виразом:

$$T_{OK} = \frac{C_{\Sigma} + C_{DM} + C_B}{Ц_{P_{веу}} - C_B} \quad (7.14)$$

$$T_{OK} = \frac{51405 + 6682,7 + 5140,5}{27370,5 - 11097} = \frac{76389,15}{16273,5} = 3,88 \text{ (роки)}.$$

Висновок: аналізуючи отримані результати розрахунків можна зробити висновок, що досліджувана ВЕУ в комплексі із врахуванням виконанням усіх робіт по її встановленню при величині природного потенціалу вітру окупить себе за 3,88 роки завдяки використанню ефективних можливостей вітроенергетичної установки на базі синхронного генератора.

8 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У магістерській дипломній роботі розглянуті заходи з підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом. При виконанні робіт з монтажу та обслуговування електрообладнання вітрового комплексу передбачається створення належного температурного режиму, який забезпечує необхідні санітарно-гігієнічні норми праці і виробництва продовольчих товарів. Усі металеві неструмоведучі частини (корпуса електродвигунів, шаф, світильників, тощо), які можуть опинитися під напругою в наслідок пошкодження ізоляції, заземлюються шляхом приєднання до нульового проводу живлячої мережі.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які впливають на оперативно-ремонтний персонал, що обслуговує електропривод вітрового комплексу, у відповідності з прийнятою класифікацією.

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); іонізація повітря.

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (нетоксичний пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

8.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

8.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Всі роботи, які проводяться в електроустановках, що не вимагають оформлення наряду, виконуються: за розпорядженнями осіб, уповноважених на це, з попереднім оформленням у журналі обліку робіт за нарядами і розпорядженнями або в оперативному журналі; в порядку поточної експлуатації.

Розпорядження про проведення робіт має разовий характер. Термін його дії визначається тривалістю робочого дня виконавців. За необхідності продовження роботи, в разі зміни її умов або складу бригади, розпорядження віддається знову. Працівник, який віддав розпорядження, призначає керівника робіт (наглядача), членів бригади, визначає можливість безпечного проведення робіт і визначає необхідні для цього організаційні та технічні заходи. Розпорядження записується в журнал обліку робіт за нарядами і розпорядженнями особою, яка його віддала, або оперативним працівником, де вказується:

- ким віддано розпорядження;
- зміст і місце роботи;
- заходи безпеки;
- час виконання роботи;
- прізвища, ініціали, групи з електробезпеки керівника робіт (наглядача) і всіх членів бригади. Змінювати склад бригади, що працює за розпорядженням, в процесі роботи забороняється.

Розпорядження про роботу віддається керівнику робіт і допускатеві або працівникові, який дає дозвіл на підготовку робочого місця і на допуск. В електроустановках без місцевих чергових працівників в тих випадках, коли допуск до роботи не вимагається, розпорядження може бути віддано безпосередньо працівнику, який виконує роботу, Інформація про закінчення

робіт, виконаних за розпорядженням, повідомляється працівникові, який віддав розпорядження, з відповідним записом у журналі.

При роботі, яка зв'язана з дотиком до струмоведучих частин електродвигуна або до обертових частин електродвигуна, який приводить в рух механізм, необхідно зупинити електродвигун та на його пусковому пристрої або ключі керування повісити плакат "НЕ ВМИКАТИ, ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ". При роботах за межами КРУ на відхідних ПЛ або КЛ на підключеному до них обладнанні візок з вимикачем необхідно викотити з шафи; верхню заслінку або дверці закрити на замок та вивісити плакати "НЕ ВМИКАТИ!" або "НЕ ВМИКАТИ! РОБОТА НА ЛІНІЇ".

Розшиновку або від'єднання кабеля при підготовці робочого місця може виконати ремонтний робітник, який має третю групу. Під наглядом чергового або оперативно-ремонтного робітника. З найближчих до робочого міста струмоведучих частин до наступних доторканню повинна бути знята напруга або вони повинні бути огорожені.

Відключене положення комутаційних апаратів до 1000 В з недоступними для огляду контактами (автоматичні вимикачі, пакетні вимикачі, рубильники в закритому виконанні тощо) визначається перевіркою відсутності на їх затискачах або на відходячих шинах, проводах або затискачах обладнання, яке відключається цими комутаційними апаратами.

В електроустановках до 1000 В при роботах на збірних шинах РУ, щитів, збірок напруга з шин повинна бути знята та шини (за винятком шин, які виконані ізольованим проводом) повинні бути заземлені. Необхідність та можливість встановлення на приєднання цих РУ, щитів, збірок та підключеного до них обладнання визначає працівник, який видає наряд (розпорядження).

Перед допуском до роботи на електродвигунах насосів, димососів та вентиляторів, якщо можливо обертання електродвигунів від з'єднаних з ними механізмів, повинні бути закриті та заперті на замок засувки цих механізмів, а також прийняті заходи для гальмування ротора електродвигунів.

Ремонт і наладку електросхем електроприводів, не з'єднаних з виконуючим механізмом, регулюючих органів та запірної арматури, можна проводити по розпорядженню. Дозвіл на їх випробування дає працівник, який дав розпорядження на вивід електропривода в ремонт, наладку. Про це повинен бути зроблений запис при оформленні розпорядження. При роботі на електродвигуні заземлення встановлюється на кабелі (з від'єднанням або без від'єднання його від електродвигуна) або на його приєднанні в РУ. Вмикання електродвигуна для перевірки до повного закінчення роботи проводиться після виводу бригади з робочого місця.

Після випробування проводиться повторний допуск з оформленням в наряді. При виконанні роботи по розпорядженню на повторний допуск розпорядження дається заново.

8.1.2 Електробезпека

Живлення силового обладнання та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – підвищеної небезпеки, у зв'язку з наявністю у цехах підвищеної вологості. Технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; - підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від

КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі. Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізолюваними ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

8.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

8.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [6] встановлюють оптимальну та допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення.

Таблиця 8.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості Па	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [7]:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні допустимих параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм.

2. Якщо температура поверхонь вище або нижче допустимої температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше їм.

3. Для забезпечення нормованих значень руху кисню проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

8.2.2 Склад повітря робочої зони

В умовах даного виробництва в цехах можливим забруднювачем являється нетоксичний пил.

Таблиця 8.2 – Концентрація шкідливих речовин в повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимальна разова	Середня добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для видалення шкідливих домішок з повітря у виробничих приміщеннях проектом передбачено [7] застосування вентиляції і кондиціонування повітря.

Природню аерацію в теплу пору року можна регулювати за допомогою фрамуг, які встановлюються у віконних пройомах і через витяжні ліхтарі, які

встановлюються на даху приміщення – це безканална вентиляція. Більш активна вентиляція забезпечується пристроєм вентиляційних каналів, які споруджуються у стінах приміщення. При цьому для підсилення швидкості руху повітря на виході теплого повітря зовні, а саме на трубі, яка розташовується на даху будівлі, встановлюють спеціальні камери-патрубки.

Природна вентиляція не передбачає підігрів та зволоження повітря, яке поступає у приміщення, і очистка від пилу повітря, яке видаляється на зовні, тому для досягнення максимального рівня вентиляції ще використовують механічну вентиляцію.

8.2.3 Виробниче освітлення

Вплив світла на життєдіяльність людини вивчений досить добре. Воно впливає не лише на функцію зору, а й на діяльність організму в цілому: посилюється обмін речовин, збільшується поглинання кисню і виділення вуглекислого газу. Відомий сприятливий вплив природного освітлення на скелетну мускулатуру. Недостатня або надмірна освітленість, нерівномірність освітлення в полі зору втомлює очі, призводить до зниження продуктивності праці; при цьому зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків.

Раціональне освітлення – один з основних факторів створення сприятливих робочих умов праці. Недостатнє освітлення викликає передчасне стомлення працюючих, знижує продуктивність праці, може стати причиною нещасного випадку.

У приміщенні використовується штучне та природне освітлення.

Система штучного освітлення – комбінована, оскільки поряд із загальним освітленням (тип джерела освітлення – лампи світлодіодні) використовуються індивідуальні джерела світла (настільні світильники з лампами світлодіодними).

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та суміщеному освітленні (відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [8], характеристика зорової роботи – дуже високої точності, розряд зорової роботи – II, підрозряд – в) зазначені у таблиці 5.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 8.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,15 до 0,3 включно	II	в	малий середній великий	світлий середній темний	1500	200	-	4,2

Для загального освітлення приміщень рекомендується використовувати головним чином, світлодіодні лампи, що обумовлюється наступними перевагами: високою світловою віддачею (до 75 лм/Вт і більше); довгим часом використання (до 10000 годин); малою яскравістю поверхні, що світиться; спектральним складом випромінюючого світла (для деяких видів ламп цей склад є близьким до природного світла, що забезпечує гарну передачу кольорів). Разом з тим необхідно врахувати і недоліки цих ламп: висока пульсація світлого потоку та пов'язана з цим можливість стробоскопічного ефекту; для запалювання та горіння лампи необхідно включення послідовно з ним пускорегулюючих апаратів; працездатність ламп залежить від температури

оточуючого середовища, до кінця часу роботи світловий потік зменшується більш ніж на половину від номінального.

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

8.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки» [9].

Основні параметри виробничого шуму на постійних робочих місцях в промислових приміщеннях наведені у таблиці 5.4.

Шум порушує нормальну роботу шлунка, особливо впливає на центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Таблиця 8.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху.

Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.

- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

8.2.5 Виробнича вібрація

Вібрація відноситься до факторів, які мають велику біологічну активність. Як загальна, так і локальна вібрація несприятливо впливає на організм людини, викликає зміну у функціональному стані вестибулярного апарату, центральної нервової, серцево-судинної систем, погіршує самопочуття та може призвести до розвитку професійних захворювань.

У нашому цеху присутня вібрація типу – За [10]. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання.

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 8.5.

Таблиця 8.5 – Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Категорія вібрації по санітарним нормам	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		$m \cdot s^{-2}$	ДБ	$m \cdot s^{-2} \cdot 10^{-2}$	ДБ
Загальна	Zo, Yo, Xo	0,1	100	0,2	92

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

- динамічне погашення вібрації - приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;

- зміна конструктивних елементів машин;
- застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

8.2.6 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори вибираються відповідно з Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, затвердженої Наказом Міністерства охорони здоров'я № 528 від 27 грудня 2001 року.

Фізичні навантаження. Робоча поза: Періодичне перебування в незручній та/або фіксованій позі до 50% часу зміни; перебування у вимушеній позі (навпочіпки, на колінах і т. ін.) від 10% до 25% часу зміни; знаходження в позі стоячи від 60% до 80% часу зміни.

Сумарна маса вантажів, що переміщуються протягом кожної години зміни: з робочої поверхні (чоловіки): до 1500

Нахили корпуса (вимушені, більше 30), кількість за зміну: 101 –300

Переміщення у просторі (переходи, обумовлені технологічним процесом протягом зміни), км/ По горизонталі: до 12. По вертикалі: до 8

Інтелектуальні навантаження: Рішення складних завдань з вибором за відомим алгоритмом (робота за серією інструкцій)

Зміст роботи: Сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальним значеннями. Заключна оцінка фактичних значень параметрів, Обробка, перевірка і контроль за виконанням завдання, Робота в умовах дефіциту часу

Сенсорні навантаження: Тривалість зосередженого спостереження (в % від часу зміни) 51-75. Щільність сигналів (світлових, звукових) та повідомлень в середньому за годину роботи 176–300. Кількість виробничих об'єктів одночасного спостереження 11-25

Навантаження на зоровий аналізатор (Спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) 3-4

Навантаження на слуховий аналізатор (при виробничій необхідності сприйняття мови чи диференційованих сигналів) Розбірливість слів та сигналів від 70% до 50%

Навантаження на голосовий апарат (сумарна кількість годин, що наговорюються протягом тижня) 20-25

Емоційне навантаження: Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності. Значущість помилки – Несе відповідальність за функціональну якість основної роботи (завдань). Вимагає виправлень за рахунок додаткових зусиль всього колективу (групи, бригади та ін.)

Ступінь ризику для власного життя: Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб

Монотонність навантажень: Кількість елементів (прийомів), необхідних для реалізації простого завдання або в операціях, які повторюються багаторазово 5-2

Тривалість виконання простих виробничих завдань чи операцій, що повторюються (сек.) 24-2

Монотонність виробничої обстановки (час пасивного спостереження за технологічним процесом в % від часу зміни) 91-95

Режим праці: Фактична тривалість робочого дня (год.) 10– 12

Змінність роботи Тризмінна робота (робота у нічну зміну)

Наявність регламентованих перерв та їх тривалість Перерви нерегламентовані або недостатньої тривалості до 3% часу зміни

8.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Дослідження безпеки роботи системи керування вітровим електротехнічним комплексом в умовах дії загрозливих чинників НС

Всі електричні станції мають свої слабкі ланки до і є досить вразливими до дії загрозливих чинників, що виникають у надзвичайних ситуаціях. Система керування вітровим електротехнічним комплексом є особливо уразлива через велику територію та безліч елементів можливого впливу чинників НС. Електропостачання багатьох об'єктів є стратегічним елементом, тому і важливим є питання забезпечення високої стійкості роботи вітроенергетичної установки.

Вплив радіації на матеріали та обладнання залежить в основному від виду випромінювання, дози опромінення, умов навколишнього середовища тощо. Найбільш чутливе до дії іонізуючого випромінювання є електронне обладнання системи керування вітровим електротехнічним комплексом. Серед елементів є напівпровідники, блок живлення, блок керування та силові елементи, транзистори, діоди. Через впливи на ізоляцію в трансформаторах можливі замикання обмоток, а відповідно і вигорання обмоток чи загорання трансформаторів.

Після опромінення системи в регуляторах змінюється струм і коефіцієнти підсилення; в конденсаторах понизиться напруга пробою і опір витоку, зміниться провідність і внутрішнє нагрівання. В ізоляційних і діелектричних матеріалах зміняться такі параметри: електрична провідність та діелектрична провідність.

Особливо велику загрозу для системи керування вітровим електротехнічним комплексом має вплив електромагнітного імпульсу, який може призвести до загорання чутливих електричних та електронних елементів, а також внести серйозні порушення в роботу цифрових і контрольних пристроїв. Електромагнітний імпульс пробиває ізоляцію, випалює елементи мікросхем, викликає коротке замикання. Дія електромагнітного імпульсу також

може призвести до загоряння чутливих електричних та електронних елементів, а також до серйозних порушень в цифрових і контрольних пристроях. Електромагнітний імпульс пробиває ізоляцію, випалює елементи мікросхем, викликає коротке замикання. Саме тому є необхідність запобіганню при дії цього фактору на електричне та електронне обладнання. Ці наслідки в подальшому призводять до пожеж на підприємстві та вибухів. Саме тому є необхідність запобіганню дії цього фактору на електричне та електронне обладнання системи керування вітровим електротехнічним комплексом [11].

8.3.1 Дослідження безпеки роботи системи керування вітровим електротехнічним комплексом в умовах дії іонізуючих випромінювань

За критерій безпеки роботи системи керування вітровим електротехнічним комплексом в цих умовах приймається таке максимальне значення дози опромінення елементної бази, при якому в елементній базі можуть виникнути зміни, але РЕС ще буде працювати з необхідною якістю. Максимально допустимі значення потужності дози елементів електротехнічного комплексу наведені в таблиці 5.6.

1. За мінімальним значенням $p_{гр}$ (див. табл. 5.6) межа стійкості $p_{гр}$ роботи комплексу складає $p_{гр} = 10^4$ (Р/год).

2. Для дослідження безпеки роботи системи керування вітровим електротехнічним комплексом визначається граничне значення потужності дози гамма-випромінювання ($p_{гр}$) за наступною формулою:

$$P_{гр} = K \times p_{гр} \times K_{пос}, \quad (8.1)$$

де: K – коефіцієнт надійності, $K = 0,9..0,95$;

$p_{гр}$ – рівень радіації, що відповідає початку зворотних змін у найменш стійкого елемента;

$K_{пос}$ – коефіцієнт послаблення радіації ($K_{пос} = 7$),

$$P_{гр} = 0,9 \times 10^4 \times 7 = 6,3 \times 10^4 \text{ (Р/год)},$$

Таблиця 8.6 – Максимально допустимі значення потужностей дози.

№	Блок	Елементи системи керування вітровим електротехнічним комплексом	$P_{гр,i}$ (Р/год)	$P_{гр}$ (Р/год)
1	БЖ	Транзистори КТЗ102В	10^5	10^4
		Діоди загального призначення S1M	10^5	
2	БП	Конденсатори SMD1206 1nf, 16V	10^6	
		Резистори SMD1206 0,125 - 10кОм	10^6	
3	БКП	Мікросхеми PIC16F877	10^4	
		Діелектрики GTP15	10^4	

З вище наведених розрахунків можна зробити висновок, що безпека в умовах дії іонізуючих випромінювань буде забезпечуватись, якщо радіація в умовах експлуатації не перевищуватиме $P_{гр} = 6,3 \times 10^4$ (Р/год).

1. Розрахуємо допустимо максимальний час перебування електротехнічного комплексу гібридної вітроелектричної установки на території в умовах дії іонізуючих випромінювань та ЕМІ:

$$D_m = \frac{2P_{zp}(\sqrt{t_K^2} - \sqrt{t_{II}^2})}{1}, \quad (8.2)$$

де: $\sqrt{t_{II}^2}$, дорівнює 1;

D_m – дорівнює 10^3 ;

$t_{доп} = 12,6 \times 10^3$ (год).

Отже електротехнічний комплекс гібридної вітроелектричної установки буде працювати безпечно в умовах дії іонізуючих випромінювань.

5.3.2 Дослідження безпеки роботи системи керування вітровим електротехнічним комплексом в умовах дії електромагнітного імпульсу

В якості показника безпеки елементів комплексу до дії електромагнітного імпульсу використовують коефіцієнт безпеки [11]:

$$K_{\sigma} = 20 \lg \frac{U_{\sigma}}{U_{B(\Gamma)}} \geq 40 \text{ дБ}, \quad (8.3)$$

де U_{σ} - допустиме коливання напруги живлення;

$U_{B(\Gamma)}$ - напруга наведена за рахунок електромагнітних випромінювань у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних системах.

Спочатку визначається допустиме коливання напруги живлення:

$$U_{\delta} = U_{\text{жс}} + \frac{U_{\text{жс}}}{100} \cdot N, \quad (8.4)$$

де N - допустимі коливання (приймається $N = 5\%$)

Шляхом підстановки числових даних в (7.3) отримується:

$$U_{\delta} = 12 + \frac{12}{100} \cdot 5 = 12,6(B).$$

Визначається максимально очікувана напруга в горизонтальних лініях[20]:

$$U_B = \frac{U_{\delta}}{10^{\frac{K}{20}}} \quad (8.5)$$

Після підстановки числових даних:

$$U_B = \frac{12,6}{10^{\frac{40}{20}}} = 0,126(B).$$

З формули визначається горизонтальна складова напруженості електричного поля[20]:

$$U_B = E_{\Gamma} \cdot l_B. \quad (8.6)$$

Отже, E_{Γ} визначається:

$$E_{\Gamma} = \frac{U_B}{l_B}. \quad (8.7)$$

Після підстановки числових даних в формулу (6.6):

$$E_{\Gamma} = \frac{0,126}{5} = 0,0252(B/m).$$

Вертикальна складова напруженості електричного поля визначається з формули [20]:

$$E_{\Gamma} = 10^{-3} \cdot E_B. \quad (8.8)$$

Тоді E_B буде:

$$E_B = 0,0252 \cdot 1000 = 25,2(B/m).$$

5.3.3 Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи системи керування вітровим електротехнічним комплексом в умовах надзвичайних ситуацій

Для підвищення безпеки роботи необхідно використовувати екранування РЕА. Для цього визначимо перехідне гасіння енергії електричного поля сталевим екраном.

Розрахуємо товщини захисних екранів:

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}}, \quad (8.9)$$

де f - найбільш характерна частота, ($f = 15$ кГц).

Для двоканального системи керування вітровим електротехнічним комплексом :

$$t_1 = \frac{40 - 38.72}{5.2 \cdot \sqrt{15000}} = 0.0025 \text{ (см);}$$

Обираємо товщину стінки на порядок вище, для того щоб забезпечити необхідний захист обладнання. Прийmemo $t=0,1$ см.

$$A = 5,2 * 0,102 * \sqrt{15000} = 65 \text{ (дБ)}$$

Висновок:

Отже нам потрібно взяти сталевий екран товщиною 1 мм, який забезпечує згасання енергії електричного поля 65 дБ.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі наведено вирішення задачі розробки пристрою автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом, що відрізняється законом регулювання, який дозволяє відбирати максимум потужності від вітрового колеса і стабілізувати напругу на виході вітрової установки, та його технічною реалізацією, що дозволяє підвищити ефективність використання енергії вітрового потоку.

Розроблено закон керування для регулятора струму збудження вітрового електротехнічного комплексу в режимі максимуму відбору потужності від вітрового.

Запропоновано структуру системи керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання вітрового колеса, яка забезпечує його роботу у точці максимуму відбору потужності вітрового колеса.

Для покращення якості електричної енергії, отримуваної за допомогою вітрового електротехнічного комплексу, удосконалено математичну модель процесу керування з застосуванням теорії нечітких множин і запропоновано структуру нечіткого.

Промодельовано запропоновану систему автоматичного керування струмом збудження вітрового електротехнічного комплексу у середовищі Matlab Simulink та здійснено дослідження стійкості роботи та якості генерованої вітровим електротехнічним комплексом напруги

Розроблено структурну схему мікропроцесорного засобу та алгоритм його роботи для реалізації функцій регулятора системи автоматичного керування струмом збудження вітрового електротехнічного комплексу на базі контролера з підтримкою Fuzzy Logic, що дозволяє підвищити гнучкість та спростити процес налагодження запропонованої системи.

Виконано економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропривода. Визначено, що за рахунок впровадження запропонованих рішень досягається економія річних експлуатаційних витрат.

Це підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дерзкий В.Г. Аналитический прогноз развития мировой ветроэнергетики / В.Г. Дерзкий // Энергетика и электрификация. – 2000. – №1. – С.53-56.
2. Зміни та доповнення до комплексної програми будівництва вітрових електростанцій // МКР з питань будівництва вітрових електростанцій. - 2000. - 109с.;
3. Подгуренко В.С. Анализ развития ветроэнергетики в Украине // Энергетика и электрификация. - 2000. - №2. - С.40-51.
4. Харитонов В.П. Ветроэнергетические ресурсы, состояние и перспективы использования энергии ветра // Энергетическое строительство. - 1991. - №3. - С. 20-24.
5. Шихайлов Н.А. Развитие ветроэнергетики в Украине // Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразователи энергии: Сборник научн. статей: В 2 ч.– Харьков. – 1997. - Ч.1. – С.9-10.
6. Развитие возобновляемых источников энергии в России: возможности и практика (на примере Камчатской области). Сборник. – М.: ОМННО «Совет Гринпис», 2006. – 92 с.
7. Мартиросов С.Н., Муругов В. П. Развитие ветроэнергетики в мире // Возобновляемая энергия. Ежеквартальный информационный бюллетень - 2000. - №6. – С.1-4.
8. Бриль А.О., Васько В.П., Васько П.Ф. Особливості функціонування промислових вітроелектричних станцій у складі регіональної електричної системи // Доклады III международной конференции “Нетрадиционная энергетика в XXI веке”, Крым, Судак, 9-15 сентября 2002 г. – Киев: ИТТФ НАНУ. – 2002. – С. 112-113.
9. Будзяк В. Становление ветроэнергетики в Украине // Энергетика Украины. – 1992. - №3. – С.13-17.
10. Васько П.Ф. Питомі характеристики енергетичного потенціалу вітру на території України // Энергетика и электрификация. – 1997. – №4. – С. 53-55.

11. Васько П.Ф. Системи електромеханічного перетворювання енергії вітру: Автореф.дис... д-ра техн. наук: 05.14.08 / Інститут електродинаміки НАН України. – Київ, 1998. – 33 с.
12. Васько П.Ф., Брыль А.А., Пекур П.П. Определение технических показателей эффективности использования ветроэлектрических агрегатов в Украине // Энергетика и электрификация. – 1995. – №2. – С. 48-51.
13. Вашкевич К.П. Аэродинамические характеристики ветродвигателей ветроэлектрических установок // Изв. Академии наук России. Энергетика. – 1997. – № 3. – С. 4–17.
14. Вітроенергетичні установки малої потужності для безперебійного живлення автономних енергоспоживачів // Пропозиція. - 2001. - №10. – 106 с.
15. Васько В.П. Оценка объемов выработки электроэнергии современными ветроустановками в ветровых условиях Крыма // В кн.: Устойчивый Крым. Энергетическая стратегия XXI века. - Симферополь: Экология и мир. – 2001. – С. 319-325.
16. Ветроэлектрические станции / В.Н. Андрианов, Д.Н. Быстрицкий, К.П. Вашкевич, В.Р. Секторов / Под ред. В.Н. Андрианова. - М.: Госэнергоиздат, 1960. - 250 с.
17. ГКД 3.003 – 2000. Вітроенергетика. Вітрові електричні установки. Порядок поставлення на серійне виробництво / Бриль А.О., Васько В.П., Хілько В.А., Шульга В.Г. – Київ: Державний комітет промислової політики України, 2000. – 31 с.
18. ГКД 341.003.001.002-2000. Правила проектування вітрових електричних станцій / Жовмір М.М., Симонов А.С. та інші. – Строк перевірки 2004 р. – Київ: Мінпаливноенерго України, 2001. – 52 с.
19. Голубенко М.С., Гембарський О.М., Решетняк М.М. Стан розвитку вітроенергетики в Україні // Энергетика и электрификация. - 2000. - №12. – С.36-37.
20. Голубенко Н.С., Цыганов В.А. Опыт разработки, создания и экспериментальной отработки ветроэлектрических агрегатов средней мощности

в ГKB «Южное» // Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразователи энергии: сборник научн. статей: В 2 ч. – Харьков, 1997. -Ч.1. – С.23–24.

21. Денисенко Г.И., Васько П.Ф., Брыль А.А., Некур П.П. Энергетика автономных ветроустановок // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1990. - №3. - С.130-135.

22. Денисенко Г.И., Федосенко Л.П., Козловский Г.А. Проектирование и расчет ветроэлектрических станций: учеб. пособие. – Киев: КПИ, 1986. – 64 с.

23. ДСТУ 3896-99. Вітроенергетичні установки та вітроелектричні станції. Терміни та визначення. – Київ: Держстандарт України, 1999. – 21 с.

24. ДСТУ 4037-2001. Вітроенергетика. Установки електричні вітрові. Загальні технічні вимоги. – Київ: Держстандарт України, 2001. – 28 с.

25. Энергетична сумісність вітроелектростанцій в складі централізованої електроенергетичної системи / Брыль А.О., Васько В.П., Васько П.Ф. Пекур П.П. // Доклады III международной конференции “Нетрадиционная энергетика в XXI веке”, Крым, Судак, 9-15 сентября 2002 г. – Киев: ИТТФ НАНУ. – 2002. – С. 113-115.

26. Жовмір М.М., Шульга С.В. До питання про доцільність будівництва вітрових електростанцій в Україні // Энергетика и электрификация. - 2000. - №4. - С.36-40.

27. Жумабеков К.С., Барбашинова Н.С., Буркитбаев Б.О. Анализ тенденций развития технических решений в ветроэнергетике // Вестн. с.-х. науки Казахстана.- 1990. - №5. – С. 98-100.

28. Методика розрахунку аеродинамічних характеристик вітродвигуна роторного типу (ВДР) / В.М.Кутін, В.П.Горенюк // Вісн. Вінниц. політехн. ін-ту. – 1999. - № 2. – С.57-62.

29. Кравцов В.С. Олейников А.М. Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветрогенераторы. – Учебник. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т."Харьк. авиац. ин-т.",2003. – 400 с.

30. Кудря С.О. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії в регіоні // Доповіді першої міжнародної науково-практичної конференції "Наука і вітроенергетика".-Львів.-2001.-С. 91-95.
31. Кудря С.О., Тучинский В.Г. Основные задачи МНТЦ вітроенергетики НАНУ по науково-техничному супроводу комплексної програми будівництва ВЕС в Україні // Труды Третьей международной конференции «Нетрадиционная энергетика в XXI веке». – Судак. – 2002. – С. 32-36.
32. Кукушкін В.І. Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні // Доповіді першої міжнародної науково-практичної конференції „Ветроенергетика сегодня”. – Львів. – 2001. – С. 96-98.
33. Кукушкин В.И. Создание ветроэнергетического направления в промышленности Украины и строительство ветровых электростанций как экологически чистой отрасли промышленности // Труды Третьей международной конференции «Нетрадиционная энергетика в XXI веке». – Судак. – 2002. – С. 30-32.
34. Васько П.Ф. Питомі характеристики енергетичного потенціалу вітру на території України // Энергетика и электрификация. – 1997. – №4. – С. 53-55.
35. О строительстве ветровых электростанций: Постановление кабинета министров Украины от 15.06.94г. № 415
36. Олейников А.М., Пильганчук А.В., Загоруйко Л.Л. Автономные ветроэлектрогенераторы малой мощности // Сб. научн. трудов СИЯЭиП. – 1999. - №1. – С.77-79.
37. Перфилов О.Л., Шаварин В.Н. Некоторые вопросы развития ветроенергетики // Энергетическое строительство - 1991. - №3. - С. 29-33.
38. Прогнозирование мощностных и моментных характеристик ветроколеса с вертикальной осью вращения и различными аэродинамическими профилями рабочих лопастей /А.И. Яковлев, М.А.Затучная, И.Г. Головчинер, А.А. Зайкин // Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразование энергии. – Харьков. – 1997. - С.111-115.

39. Подгуренко В.С., Бордюгов В.Н. Об ошибочных утверждениях, дискредитирующих ветроэнергетику // Энергетика и электрификация. - 2000. - №12. – С. 49-53.
40. Смолінський С. Вітряки України // Ватерпас. - 1999. - № 18/19. – С. 56-61.
41. Сиротюк В.М., Воробкевич В.Ю., Сиротюк С.В. Деякі аспекти обґрунтування конструктивних параметрів вітроколів // С.-г. машини: Зб. ст. – Луцьк. – 1999. - Вип. 5. – С. 246-253.
42. Фатеев В.М. Ветро двигатели и ветроустановки. – М.: Сельхозиздат, 1957. – 536 с.
43. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветротурбины. – М.: Сельхозгиз, 1957. – 544 с.
44. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра.- М.: Энергоатомиздат, 1983.- 200 с.
45. Шефтер Я.И., Рождественский И.В. Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты. – К., 1967. – 260 с.
46. Шульга В., Кудря С., Хілько В. Від вітряка до вітроенергетики // Пропозиція. - 1998. - №11. – С.50-51.
47. Энергия ветра: оценка технического и экономического потенциала / Л. Ярас, Л. Хоффман, А. Ярас, Г. Обермайер/ пер. с англ. под ред. Я.И. Шефтера. – М.: Мир, 1982. – 256 с.
48. Яковлев А.И., Затучная М.А., Тыхевич О.О. Энергетические характеристики ветротурбин различного типа // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2000. - Вып.21. - С.88-91.
49. Яковлев А.И., Затучная М.А. Энергетические характеристики ветротурбин с вертикальной осью вращения. // Авиационно-космическая техника и технология. – 1998. - Вып.7. - С. 98-102.
50. Янукович В.Ф., Минаев А. А Перспективы большой ветроэнергетики // Энергетика и электрификация. - 2000. - № 5. - С. 1-6.
51. Ветроэнергетика / Под ред. Д. де Рензо.- М.: Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.

52. Денисенко Олег Григорьевич. Преобразование и использование ветровой энергии: Козловский Г.А., Федосенко Л.П. – Киев: Техника, 1992. – 176 с. – ISBN 5-335-00857-1
53. Мокін Борис Іванович. До питання вибору вітрових двигунів і електричних генераторів вітрових електричних станцій / Б.І.Мокін, О.Б.Мокін, О.А.Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №6. – С.52-62.
54. Алексеевский, Д. Г. Электромеханическая система ветроэнергетической установки на базе сверхсинхронного вентильного каскада: автореф...канд.техн.наук / Д.Г. Алексеевский ; Нац.горный ун-т М-во образования и науки Украины. - Днепропетровск, 2003. - 19 с.
55. Рогозин А.А., Пенегин А.Л. Сопоставительный анализ условий работы асинхронных и синхронных ветро-электрических генераторов // Электричество.- 1996. - № 2. – С. 36-43.
56. Carlson O., Hylander J., Tsilos S. Variable speed AC - generators applied in WECS // EWEC'86. - 1986. - 1. Sec. D, D23 -P. 685 - 690.
57. Joanne Hui An Adaptive Control Algorithm for Maximum Power Point Tracking for Wind Energy Conversion Systems / Joanne H. // 2008 Queen's University. A thesis submitted to the Department of Electrical and Computer Engineering in conformity with the requirements for the degree of Master of Science (Engineering). 83 pp. Kingston, Ontario, Canada.
58. J. Marques, H. Pinheiro, H. Grundling, J. Pinheiro, and H. Hey, "A survey on variable-speed wind turbine system," Proceedings of Brazilian conference of electronics of power, vol. 1, pp. 732 – 738, 2003.
59. S. Muller, M. Deicke, and R.-W. De Doker, "Adjustable speed generators for wind turbines based on doubly-fed induction machines and 4-quadrant igtb converters linked to the rotor," IEEE Industry Applications Conference, vol. 4, pp. 2254–2259, October 2000.
60. Мимоконяц Л.Г., Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные генераторы: состояние, проблемы, перспективы // Электричество.- 1994. - № 3. – С. 1 – 8.

61. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентиляные каскады и двигатели двойного питания.- М.: Энергия, 1979. – 200 с.
62. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. - М.: Энергия, 1972. - 240 с.
63. И.П.Копылов, Т.В. Лядова, Безредукторный ветроагрегат, а.с. СССР №868105 МПК7 F03D 9/00, Оpubл.30.09.81, Бюл.№36
64. А.М. Литвиненко, Статор ветроэлектрогенератора, патент РФ № 2270362 МПК F03D7/02 , Оpubл.27.09.2004.
65. А.М. Литвиненко, Безредукторный ветроагрегат, патент РФ № 2261366 МПК F03D7/02 , Оpubл.25.02.2004.
66. А.М. Литвиненко, Безредукторный ветроагрегат, патент РФ № 2383777 МПК F03D7/02 , Оpubл.10.03.2010.
67. И.П.Копылов, Т.В. Лядова, Безредукторный ветроагрегат, а.с. СССР №868105 МПК7 F03D 9/00, Оpubл.30.09.81, Бюл.№36.
68. И.П.Копылов, Т.В. Лядова, Безредукторный ветроагрегат, а.с. СССР №861715 МПК7 F03D 1/00, Оpubл.07.09.81, Бюл.№33.
69. И.П.Копылов, Т.В. Лядова, Безредукторный ветроагрегат, а.с. СССР №861765 МПК7 F03D 1/00, Оpubл.09.09.81, Бюл.№33.
70. И.П.Копылов, Т.В. Лядова, Безредукторный ветроагрегат, а.с. СССР №969948 МПК7 F03D 1/00, Оpubл.01.11.82, Бюл.№36
71. Патент на винахід UA №8645 МПК F03D5/00, F03D3/00. Оpubл. 27.04.2009, Бюл.№8
72. Sandra Eriksson Direct Driven Generators for Vertical Axis Wind Turbines / Sandra E. // 2008 Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 547. 88 pp. Upsala. ISBN 978-97-554-7264-1.
73. Sreedhar Reddy Guda Modeling and power management of a hybrid windmicroturbine power generation system. / Sreedhar R. G. // 2005 Montana State University. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering. 154 pp. Bozeman, Montana.

74. Fabiano Daher Adegas Maximum power point tracker for small wind turbines including harmonic mitigation. / Fabiano Daher Adegas, Jorge Antonio Villar Ale, Fernando Soares dos Reis, Gabriel Cirilo da Silva Simioni, Reinaldo Tonkoski // 2006 Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul – PUCRS. European Wind Energy Conference & Exhibition. 10 pp. Porto Alegre, RS – Brazil
75. Harki Apri Yanto Modeling and control of household-size vertical axis wind turbine and electric power generation system / Chun T. L., Jonq. C. H., Sheam C. L. // 2009 National Taiwan University of Science and Technology. 7 pp. Taipei, Taiwan.
76. Щур І.З. Багатофункціональне керування активним випрямлячем в локальній вітроенергетичній системі з вертикальною віссю обертання / І.З.Щур, О.Р.Турленко// Вестн. Нац. Ун-та «Харьк. политехн. ин-т»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков, 2008. – Вып.30. – С. 418-420.
77. Тихевич Остап Олегович.. Удосконалення методики узгодження параметрів вітротурбіни та асинхронізованого синхронного генератора вітроенергетичної установки: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.14.08 / НАН України; Інститут електродинаміки. — К., 2003. — 19 с.
78. G. Moor and H. Beukes, “Power point trackers for wind turbines,” Power Electronics Specialist Conference (PESC), pp. 2044–2049, 2004.
79. T. Nakamura, S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, “Optimum control of ipmsg for wind generation system,” Power Conversion Conference (PCC), vol. 3, pp. 1435–1440, 2002.
80. Q. Wang and L.-C. Chang, “An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, pp. 1242–1249, September 2004.
81. E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, “Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, April 2006.

82. R. Datta and V.-T. Ranganathan, “A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, pp. 163–168, March 2003.
83. <http://mahaon-energy.ru/rotornaya>
84. Глась М. И, Дымковец Ю. П, Акаев Н. А О целесообразности создания вертикально-осевых ветроэлектрических установок мегаватного класса // Энергетическое строительство. - 199. - №3. – С.33-37.
85. Мхитарян А.М. Аэродинамика.- М.:Машиностроение, 1970. – 428 с.
86. Васько В.П. Керування нестаціонарними режимами роботи вітроустановок промислових вітроелектричних станцій: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук:05.14.08/Інститут електродинаміки НАН України. – Київ, 2003. – 182 с.
87. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.:Высшая школа, 1978. – 528 с.
88. Мокін Б. І., Мокін О. Б., Жуков О. А. Векторні діаграми та математичні моделі вітрового колеса з вертикальною віссю обертання//Електронне науково-спеціалізоване видання «Наукові праці Вінницького національного технічного університету» на англ.,рос.і укр. мовах.– 2008. – Вип. 1. – Розділ: Енергетика і електротехніка. – Адрес: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.htm>
89. Мокін Б. І., Мокін О. Б., Жуков О. А. Математичні моделі сил, що діють на вітрове колесо з вертикальною віссю обертання, при ненульових кутах повороту лопатей //Електронне науково-спеціалізоване видання «Наукові праці Вінницького національного технічного університету» на англ.,рос.і укр. мовах.– 2008. – Вип. 2. – Розділ: Енергетика і електротехніка.
90. Мокін Борис Іванович. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими електродвигунами постійного струму: монографія / Б.І.Мокін, О.Б.Мокін – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 92 с. – ISBN 978-966-641-241-9
91. Мокин Борис Иванович. Автоматические регуляторы в электрических сетях

- / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. — К. : Техника, 1985. — 104 с.
92. Система автоматичного керування електричною вітроенергетичною установкою з вертикальною віссю обертання / Мокін Б. І., Мокін О. Б., Жуков О. А. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського . – 2010 – №3 С. 20 – 24.
93. Манусов В. З. Применение нечеткой логики для согласования режимов работы ветроэнергетической установки с графиком электрической нагрузки / В.З.Манусов, А.В. Седельников // Известия томского политехнического университета. – Томск, 2005. – Вып. 5. – С. 161 – 164
94. Симанков В. С. Методология нечеткого управления автономной фотоветроенергетической системой / В. С. Симанков, А. В. Шопин, П. Ю. Бучацкий // Труды ФОРА – 1999. – Вып. 4. – С. 71 – 77.
95. www.meteo.com.ua
96. Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В.И. Гостев. – К. : Радиоаматор, 2005. – 708 с
97. Кір'янов Д. В. Модель системи автоматичного керування підйомом антенної щогли в умовах дії вітрових навантажень / Д.В. Кір'янов // Системи озброєння і військова техніка – Харків, 2009. – Вип 4(20). – С. 115 – 119.
98. Кирьянов Д. В. Методика параметрического синтеза цифрового нечеткого регулятора САУ нестационарными объектами управления / Д.В. Кір'янов // Системи обробки інформації. – 2006. – Вип. 5(54). – С. 53 – 57.
99. Тутубалин Валерий Николаевич. Теория вероятностей и случайных процессов : Учеб. пособие / В. И. Тутубалин . – М. : Изд-во МГУ, 1992. – 400 с. – ISBN 5-211-02264-5.
100. Буяльская Т. Б., Мокин Б. И., Мокин А. Б. Нечеткие математические модели в задачах экспертизы художественных произведений // “Автоматика–2000”: праці міжнародної конференції, 11 – 15 вересня 2000, Львів, Україна, — Том 2. — С. 43–48.
101. Штовба Сергей Дмитриевич. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. –

288 с. – ISBN 5-93517-329-X.

102. M68HC11E Familg. Technical Data. – Motorola Inc., 2002. – 336 p. – M68HC11E/D – Rev. 4.7/2002.

103. Мокін Б. І. Математична модель пристрою керування електричною вітроенергетичною установкою з вертикальною віссю обертання / Б.І.Мокін, О.Б.Мокін, О.А.Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №3. – С.48-54.

104. Ротштейн О.П. Моделювання та оптимізація надійності багатовимірних алгоритмічних процесів / Ротштейн О.П., Штовба С.Д., Козаченко О.М. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 211 с.

105. Батищев Д.И. Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетических алгоритмов / Д.И. Батищев, С.А. Исаев // Межвузовский сборник научных трудов «Высокие технологии в технике, медицине и образовании». – ВГТУ. – 1997. – С. 4-17.

106. Сабарин Р.В. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления / Р.В. Сабарин, Н.И. Смирнов, Репин А.И. // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – №3-4. – С. 78–85.

107. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. – М: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.

108. Грабко В.В. Математична модель для коригування температурних зображень об'єктів при контролі електрообладнання / В.В Грабко, В.В. Грабко // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Електромашинобудування та електрообладнання”. Випуск 66. Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. – К.: “Техніка”. – 2006. – С. 394 – 396.

109. Бабій С.М. Технічне діагностування аналогових систем керування електропривода: 05.09.03 / Бабій Сергій Миколайович. – В., 2008. – 149 с.

110. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / Ротштейн А.П. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1999. – 320 с.
111. Грабко В.В. Математична модель для коригування температурних зображень об'єктів при контролі електрообладнання / В.В Грабко, В.В. Грабко // Міжвідомчий науково–технічний збірник “Електромашинобудування та електрообладнання”. Випуск 66. Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. – К.: “Техніка”. – 2006. – С. 394 – 396.
112. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / Леоненков А.В. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
113. А. В. Голубин. Определение параметров генетического алгоритма с помощью программного комплекса "Gensearch"; // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2004. – № 3 (19). – С. 42-47
114. Олейников А. М., Канов Л. Н., Зарицкая А.И. // Инженерная методика оптимизационного расчета тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами . – 2008 – №88 С. 104 – 107.
115. Пахомин С.А. Проектирование синхронных генераторов: Учеб. пособие к курсовому проекту по электромеханике / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – 91с.
116. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов: В 2 кн./ И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П.Морозкин и др.; Под. ред. И.П. Копылова.– 2-е изд., перераб. и доп. М.:Энергоатомиздат, 1993. Кн. 2. 384 с.
117. Применение микропроцессорной техники для регулирования напряжения в электрических сетях / Н.Г. Вишняков, В.И. Кочкин, В.К. Стрюцков // Обз. инф. Сер. Средства и системы управления в энергетике. // Информэнерго. – 1990. – №2. – С. 1-58.

118. Гребнев В.В. Однокристалльные микро-ЭВМ семейства AT89 фирмы Atmel / Гребнев В.В. – Санкт-Петербург: ЭФО, 1998. – 76 с.
119. Однокристалльные микро-ЭВМ. Семейство МК48 и МК51 / [Липовецкий Г.П., Литвинский Г.В., Оксинь О.Н. и др.]. – М.: МП "Бином", 1992. – 339 с.
120. Чумаченко І.В. Мікроконтролерні прилади: структура і використання: навчальний посібник / Чумаченко І.В., Кошовий М.Д., Лопатин В.В. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т “ХАІ”, 2001. – 277 с.
121. Микропроцессорные структуры. Инженерные решения: справочник / [сост. Шевкопляс Б.В.]. – [2-е изд.]. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
122. Микропроцессоры и микропроцессорные комплекты интегральных микросхем: справочник / [сост. Абрайтис Б.Б., Аверьянов Н.Н., Белоус А.И. и др.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 368 с.
123. Федорков Б.Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б.Г. Федорков, В.А. Телец. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
124. Аш Ж. Датчики измерительных систем. Кн. 1. / Ж. Аш; [пер. с фр.] – М.: Мир, 1992. – 480 с.
125. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден; [пер. с англ.]. – М.: Техносфера, 2005. – 592с.
126. <http://www.atmel.com/>
127. Голубцов М.С. Микроконтроллеры AVR от простого к сложному / М.С. Голубцов – М.: СОЛОН – Пресс, 2003. – 288 с.
128. Гребнев В.В. Микроконтроллеры семейства AVR фирмы ATMEL / В.В. Гребнев. – М.:ИП РадиоСофт, 2002. – 176 с.
129. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Classic фирмы Atmel / А.В. Евстифеев. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2006. – 288 с.
130. К вопросу о точности угловых энкодеров. – М.: Техническое издание отдела преобразователей линейных и угловых перемещений Renishaw plc. – 2005. – 5 с.

131. Жмак Егор Иванович. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах на основе нечеткой логики : Дис. канд. техн. наук : 05.14.02 Новосибирск, 2004. — 120 с. РГБ ОД, 61:05-5/510.
132. Воронов А. А. Основы теории автоматического регулирования и управления / А. А. Воронов, В. К. Титов, Б. Н. Новогранов. — М.: Высшая школа, 1977. — 519 с.
133. Гультияев А. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие / А. Гультияев. — СПб.: КОРОНА принт, 1999. — 288 с.
134. Потемкин В.Г. Система MATLAB 5 для студентов / В. Г. Потемкин, П. И. Рудаков. — [2-е изд.]. — М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. — 448 с.
135. Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник / В. П. Дьяконов. — СПб.: Питер, 2002. — 528 с.
136. Черных Илья Викторович. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных . — М.: ДМК Пресс, 2008. — 288 с. — ISBN 5-94074-395-1
137. Абраменко Иван Григорьевич. Компьютер-ные технологии в автоматизированных системах управления электроснабжения / И. Г. Абраменко, А. И. Кузнецов. — Харьков : ХНАГХ, 2008 . — 143 с. — ISBN 966-695-079-0.
138. Савчук В.П. Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория: [учеб. пособие для студентов вузов] / В.П. Савчук. — Одесса: ОНПУ, 2002. — 54 с.
139. Хокинс Г. Цифровая электроника для начинающих / Г. Хокинс; [пер. с англ.]. — М.: Мир, 1986. — 232 с.
140. Ціделко В.Д. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання / В.Д. Ціделко, Н.А. Яремчук. — К.: ІВЦ Видавництво Політехніка, 2002. — 176 с.

141. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: [навчальний посібник] / [Є.Т. Володарський, В.В. Кухарчук, В.О. Поджаренко, Г.Б. Сердюк]. –Вінниця: ВДТУ, 2001. – 219с.
142. Мирский Г.Я. Электронные измерения / Г.Я. Мирский. – М.: Радио и связь, 1986. – 440 с.
143. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
144. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Авіація, промисловість, суспільство», 12 травня 2021 року, Кременчук 2021. [Електронний ресурс]. URL:
<https://drive.google.com/file/d/14wswflsnSyYjRuVqp9nSA1hDpDmQgKAX/view>
145. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «MODERN RESEARCH IN WORLD SCIENCE», 2-4 жовтня 2022 року, Львів 2022. [Електронний ресурс]. URL:
<https://sci-conf.com.ua/vii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-research-in-world-science-2-4-10-2022-lviv-ukrayina-arhiv/>

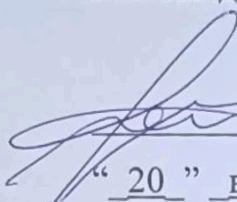
Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.



Микола МОШНОРИЗ
« 20 » вересня 2022 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

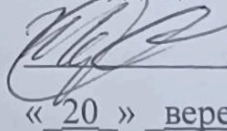
на магістерську кваліфікаційну роботу

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ**

08-16. МКР.007.00.000 ТЗ


Керівник роботи

к.т.н., доц.



Олексій ЖУКОВ
« 20 » вересня 2022 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-21м



Олександр СІЛАГІН
« 20 » вересня 2022 р.

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом».

Скорочене найменування розробки – «Система керування вітровим електротехнічним комплексом».

Замовник – кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем дипломного проектування.

3 Призначення розробки і галузь використання

Вітровий електротехнічний комплекс призначений для резервного живлення об'єктів домашнього господарства.

4 Вимоги до розробки

Система керування вітровим електротехнічним комплексом повинна забезпечувати ефективний відбір потужності від вітрового колеса.

5 Комплектація розробки

Вітровий електротехнічний комплекс складається із вітродвигуна, електричного генератора і системи керування .

6 Технічні характеристики

Тип електричного генератора – синхронний, потужністю 2000 Вт. Із електричною обмоткою збудження.

7 Джерела розробки

1. ГКД 3.003 – 2000. Вітроенергетика. Вітрові електричні установки. Порядок поставлення на серійне виробництво / Бриль А.О., Васько В.П., Хілько В.А., Шульга В.Г. – Київ: Державний комітет промислової політики України, 2000. – 31 с.
2. ГКД 341.003.001.002-2000. Правила проектування вітрових електричних станцій / Жовмір М.М., Симонов А.С. та інші. – Строк перевірки 2004 р. – Київ: Мінпаливноенерго України, 2001. – 52 с.

8 Елементна база

Генератор, апаратура керування і захисту, провідники, кабелі і т.п. виробництва України чи країн близького зарубіжжя.

9 Конструктивне виконання

Електропривод виготовляється окремими блоками, що реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у бризгозахищеному виконанні.

10 Показники технологічності

Обладнання виконується на сучасній елементній базі. Його монтаж, заземлення, струмопровід повинні відповідати правилам улаштування електроустановок.

11 Етапи виконання

Стадії і етапи розробки	Термін виконання
Основна частина	
Графічна частина	

12 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками відповідної кваліфікації. Технічний огляд пристрою

здійснюється мінімум один раз на півроку. Ремонт здійснюється електромеханіками, фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

13 Живлення електропривода

Живлення електропривода повинно бути виконане трифазною напругою 0,4 кВ.

14 Порядок контролю та прийняття Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ

Актуальність теми. Мета, об'єкт та предмет дослідження.

Актуальність теми. У зв'язку зі щорічним збільшенням споживання людством енергії, зростаючими екологічними обмеженнями та стрімким ростом цін на непоновлювані органічні енергоресурси з кожним днем все актуальнішим стає збільшення обсягів отримання енергії за рахунок використання поновлювальних її джерел, особливо енергії вітру, яка у вітрових електричних установках перетворюється в електричну

В Україні збудовано ряд вітрових електроустановок, які працюють у вузькому діапазоні зміни швидкості вітру, оскільки системи автоматичного керування ними не в змозі забезпечити стабільність частоти струму, що генерується, тобто, ці системи керування не в змозі забезпечити стабільність кутової швидкості обертання вітрових коліс ВЕУ при поривчастому характері вітрового навантаження. Поширеним способом стабілізації кутової швидкості вітрового колеса ВЕУ є зміна кутів нахилу його лопатей в залежності від потужності вітрового потоку, а такий спосіб є недосконалим, він зменшує коефіцієнт використання вітрової енергії ВЕУ від максимально можливого, ускладнює конструкцію вітрового колеса та суттєво ускладнює систему керування. Тому актуальною є задача розробки такого пристрою реалізації способу керування ВЕУ, який би забезпечував роботу ВЕУ із жорстко фіксованими лопатями у широкому діапазоні зміни швидкостей вітру, максимально можливою швидкий відбір потужності від вітрового електротехнічного комплексу (ВЕК) та прийнятну якість генерованої напруги.

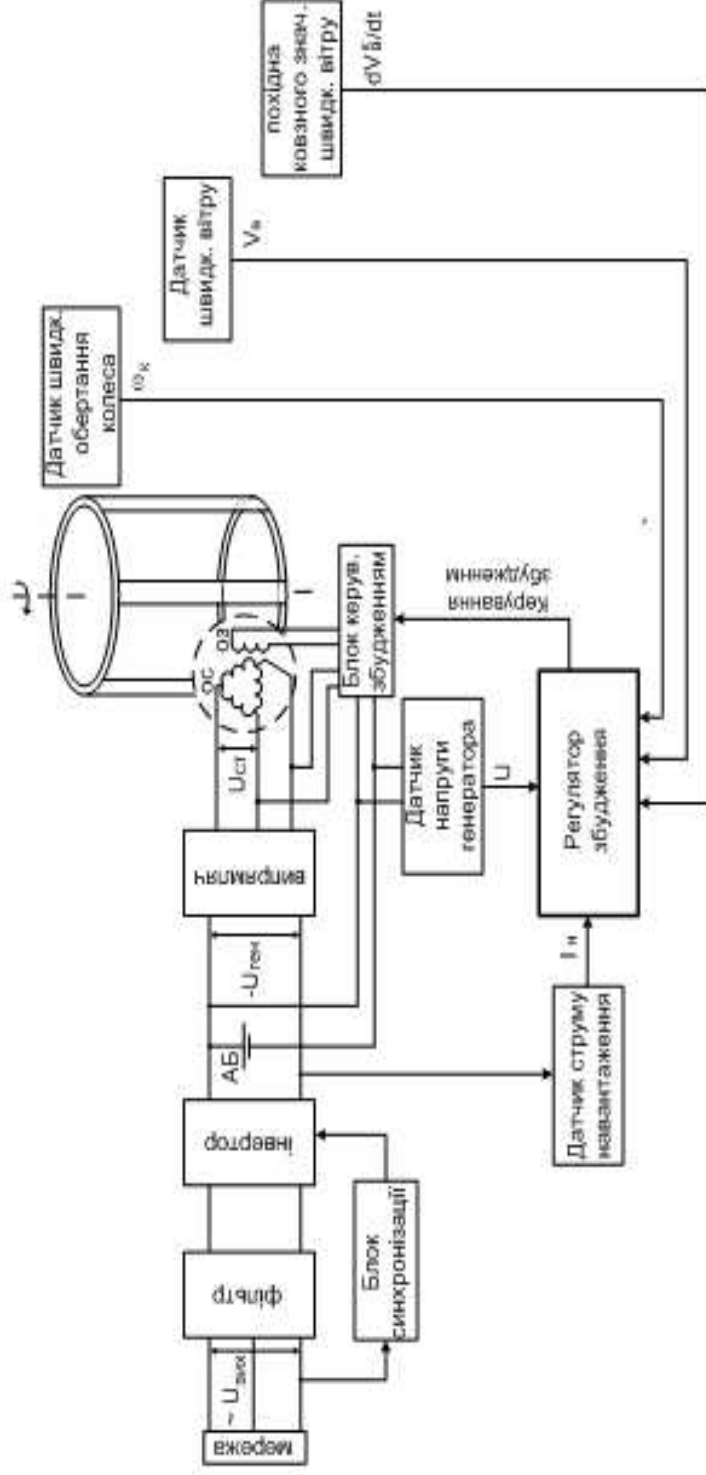
В даній роботі розглядатимуться ВЕК з вертикальною віссю обертання вітрового колеса.

Метою дослідження є підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом, шляхом створення системи автоматичного керування цим комплексом, що дозволить збільшити відбір потужності від вітрового колеса.

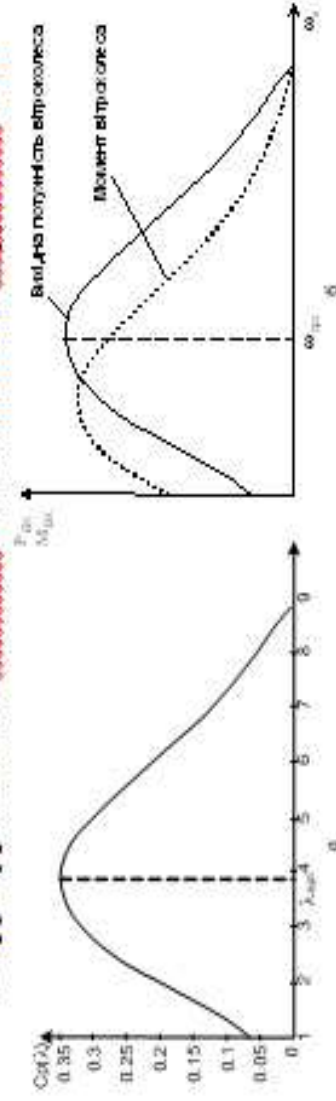
Об'єктом дослідження в магістерській роботі є вітровий електротехнічний комплекс.

Предметом дослідження є процеси регулювання потужності вітрового електротехнічного комплексу .

Структура системи автоматичного керування ВЕК

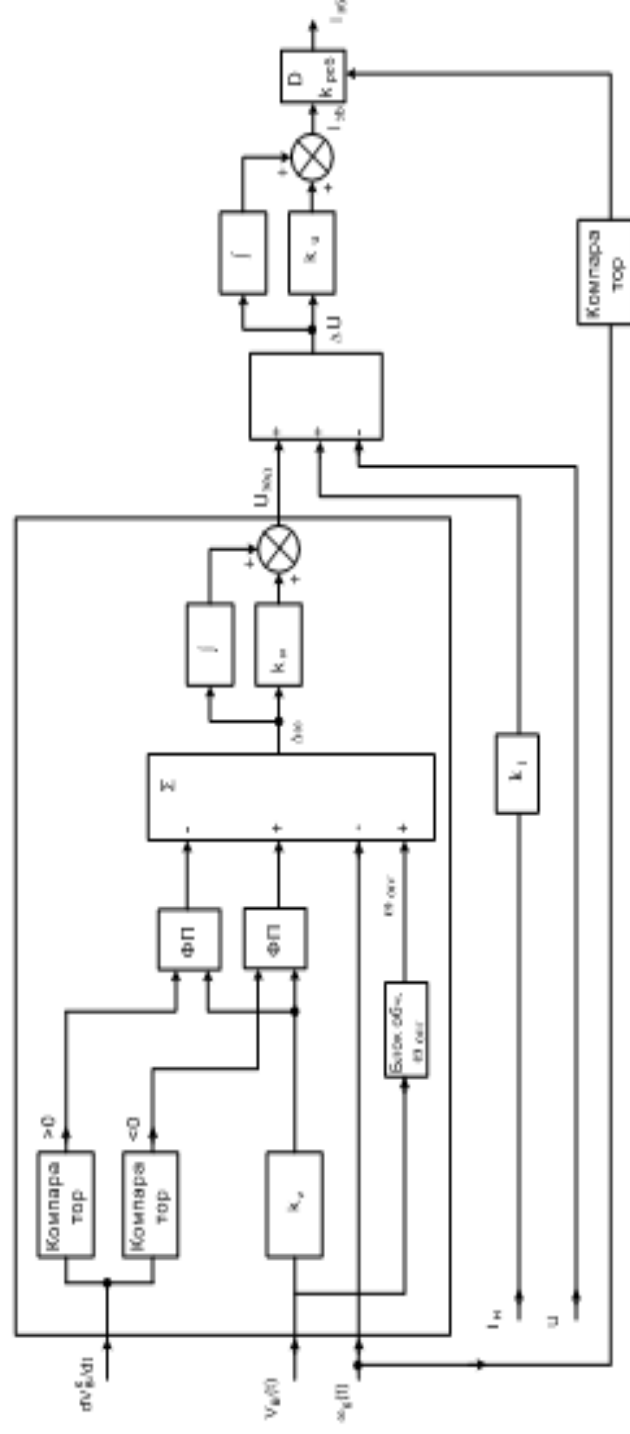


Структурна схема системи автоматичного керування ВЕК



Характеристики вітрового колеса

Структура регулятора системи автоматичного керування ВЕК та закон керування



Структура регулятора збудження ВЕК

$$\Delta\omega = \begin{cases} |\omega_{ост} - \omega(t)| - k_v \cdot V_z(t), \text{ якщо } \frac{dV_z^x}{dt} < 0; \\ |\omega_{ост} - \omega(t)| + k_v \cdot V_z(t), \text{ якщо } \frac{dV_z^x}{dt} > 0; \end{cases} \quad (6.1)$$

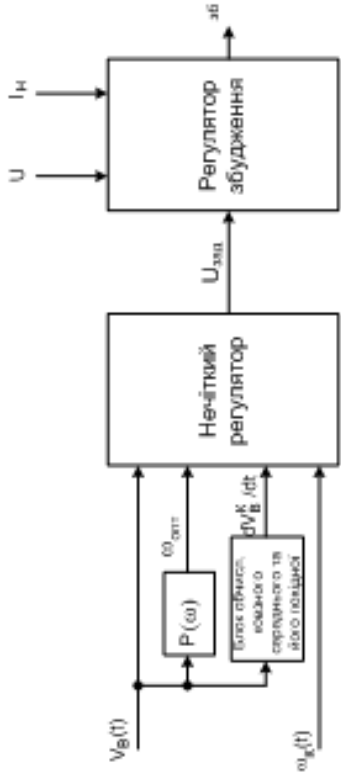
$$U_{зад}(t) = k_{\omega} \cdot \Delta\omega + \int_0^{2T} \Delta\omega dt;$$

$$\Delta U = U_{зад}(t) - (U(t) - k_I I_z(t));$$

$$I_{об}(t) = \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt \right) \cdot k_{об}.$$

Закон керування регулятора збудження ВЕК

Структура регулятора системи автоматичного керування ВЕК із блоком нечіткого логічного висновку



Структурна схема кналу регулювання системи керування віпрвою електричною установкою

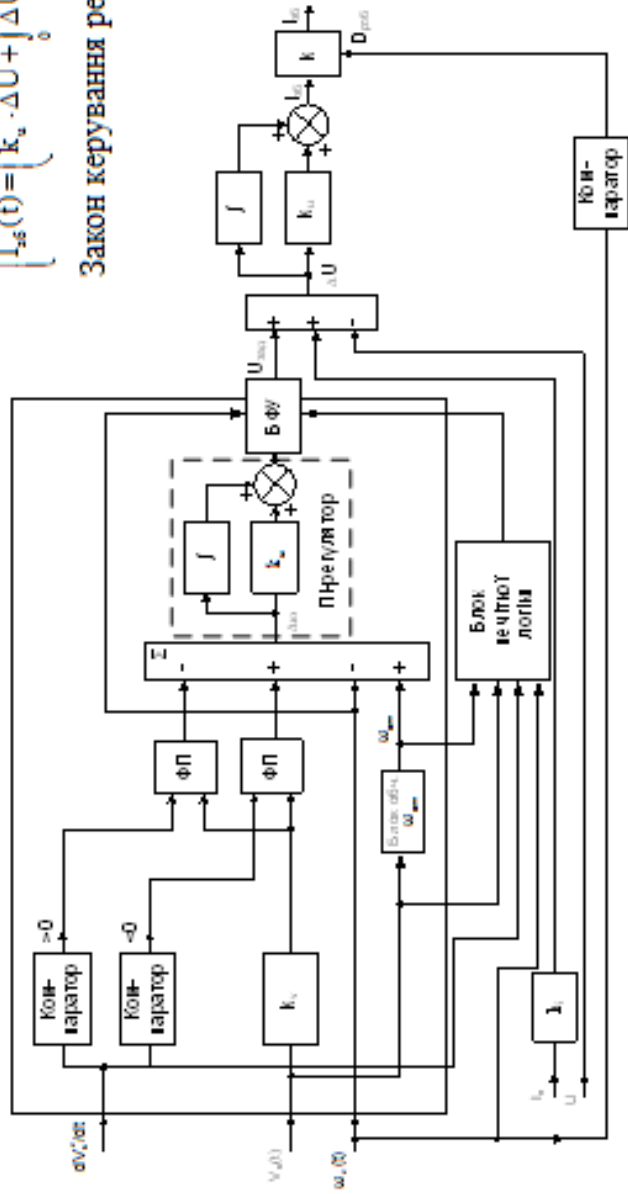
$$\Delta\omega = \begin{cases} |\omega_{змз} - \omega(t)| - k_v \cdot V_s(t), \text{ якщо } \frac{dV_s}{dt} < 0; \\ |\omega_{змз} - \omega(t)| + k_v \cdot V_s(t), \text{ якщо } \frac{dV_s}{dt} > 0; \end{cases}$$

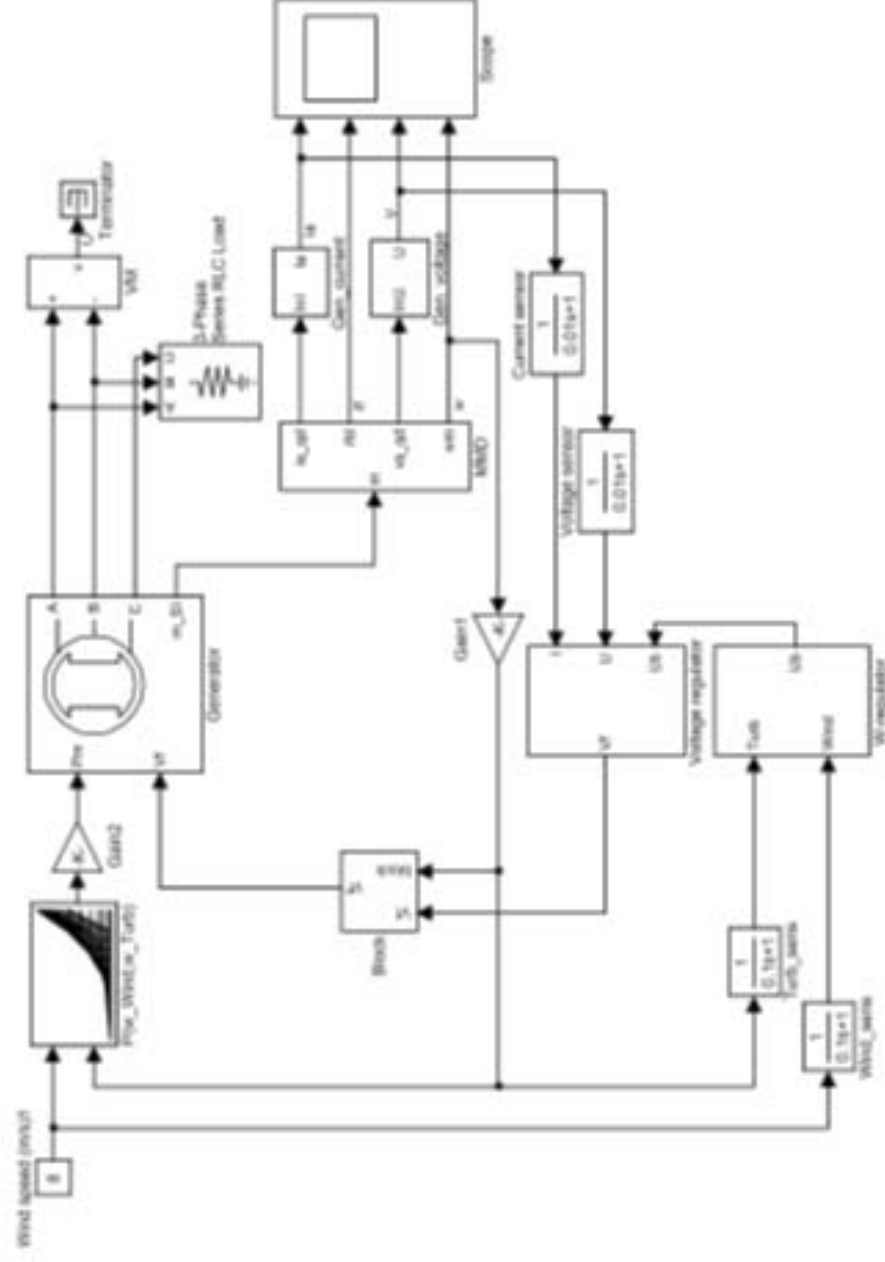
$$U_{змз}(t) = \begin{cases} k_{\omega} \cdot \Delta\omega + \int_0^t \Delta\omega dt, \text{ якщо } \omega_s > \omega_{сп}; \\ \text{fuzzy} \left(V_s, \frac{dV_s}{dt}, \omega_s, \omega_{змз} \right), \text{ якщо } \omega_s \leq \omega_{сп}; \end{cases}$$

$$\Delta U = U_{змз}(t) - (U(t) - k_1 I_s(t));$$

$$I_{сп}(t) = \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^t \Delta U dt \right) \cdot k_{pss}$$

Закон керування регулятора збудження ВЕК





Voltage regulator – регулятор, що керує струмом збудження;

Generator – електромеханічного перетворювача;

Wind speed – блок константи, що формує завдання швидкості вітру

P(w_Wind_w_Turb) – вітрова турбіна;

Gain2 підсилювач, для приведення

потужності вітрового колеса до валу

електромашинного перетворювача;

RLC Series Load – блок навантаження;

Turb_sens – сенсор швидкості обертання турбіни;

Wind_sens – сенсор швидкості вітру;

Current sensor, Voltage sensor – сенсори

струму та напруги відповідно;

MMD – блок для моніторингу стану

перетворювача;

Gen_current, Gen_voltage – блоки для

визначення діючих значень струмів та

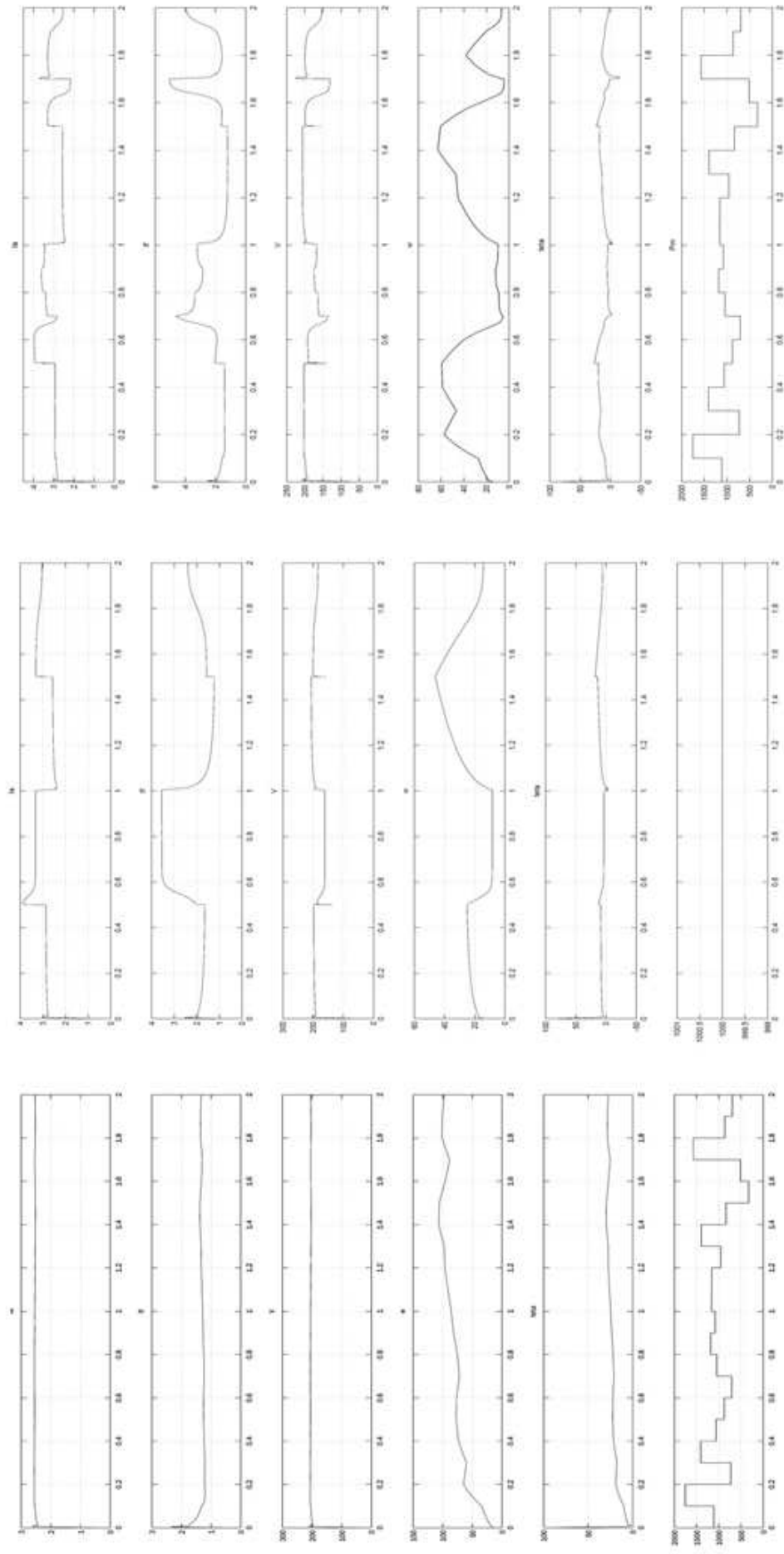
напруг перетворювача;

Voltage Regulator – регулятор напруги;

W-regulator – головний регулятор системи керування;

Комп'ютерна модель системи автоматичного керування БЕК, створена в ППП [Matlab 6.5 Simulink](#)

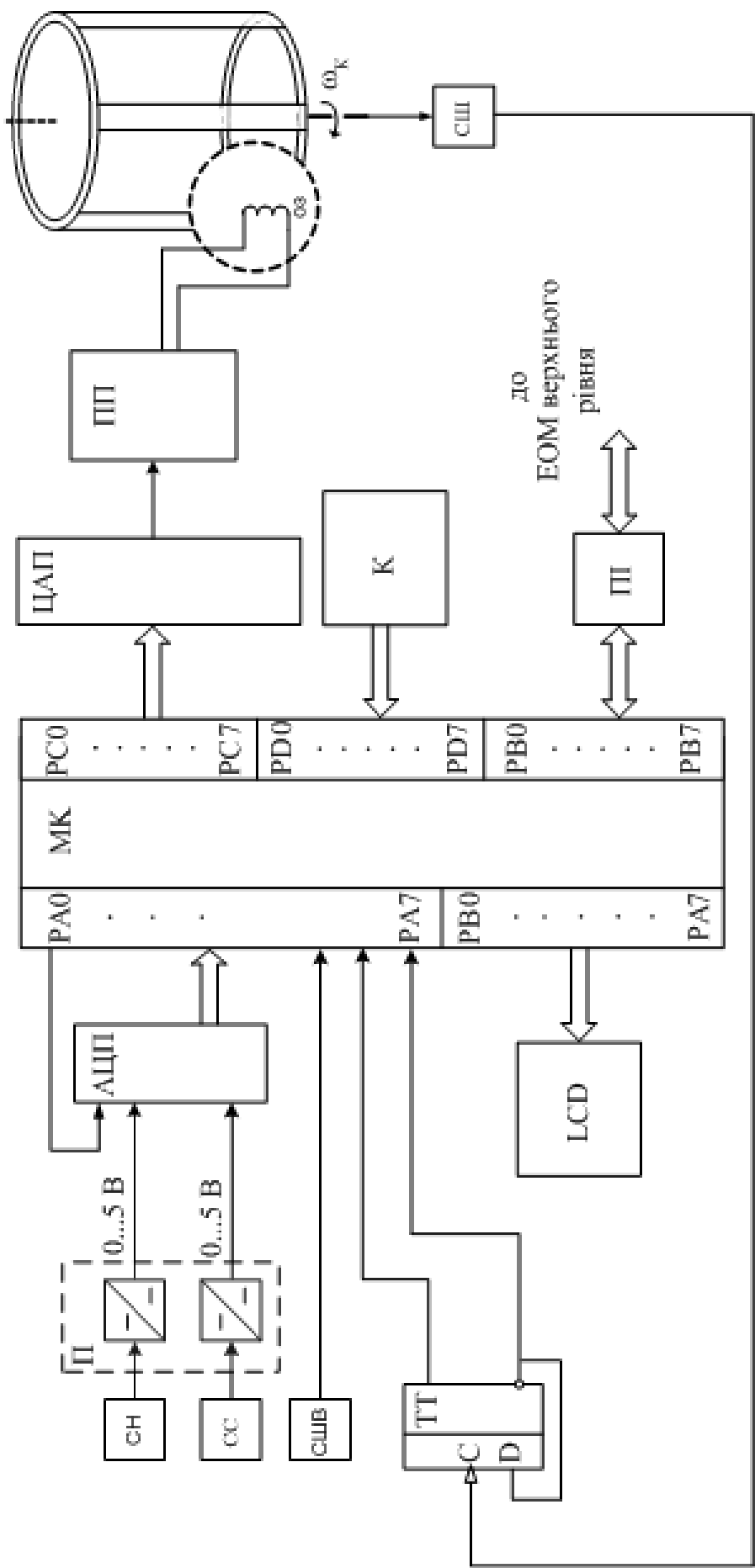
Результати моделювання системи автоматичного керування струмом збудження ВЕК



Перехідні процеси ВЕК при збуреннях з боку вітру та навантаження

Перехідні процеси ВЕК при збуреннях з боку вітру

Перехідні процеси ВЕК при збуреннях з боку навантаження



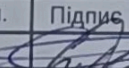

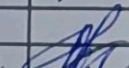
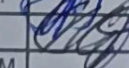

Функціональна схема мікропроцесорного пристрою керування струмом збудження генератора ВЕК

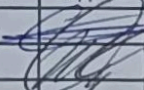
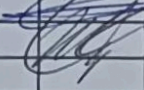
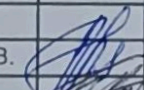
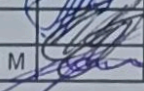
Наукове і практичне значення одержаних результатів

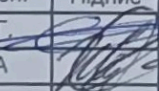
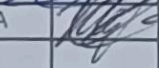

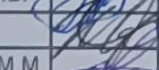
Наукова новизна: Розроблено закон керування для регулятора струму збудження генератора вітрового електротехнічного комплексу, що забезпечує його роботу у точці максимального відбору потужності вітрового колеса.


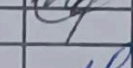

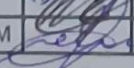

Практичні результати:

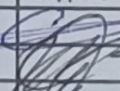


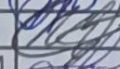
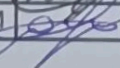
1. Отримав подальший розвиток підхід до побудови комбінованого регулятора збудження вітрового електротехнічного комплексу, що полягає у поєднанні переваг чіткого і нечіткого законів керування.
2. Розроблено регулятор системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з врахуванням атмосферних впливів, що являє собою комбінований регулятор, який складається з ПІ-регулятора та нечіткого регулятора, які працюють по чергово в залежності від швидкості вітрового потоку, що дозволяє проводити одночасне керування вітровим електротехнічним комплексом в функції напруги та максимуму відбору потужності.
3. Розроблено структурну схему мікропроцесорного засобу та алгоритм його роботи для реалізації функцій регулятора системи автоматичного керування струмом збудження вітрового електротехнічного комплексу на базі контролера з підтримкою Fuzzy Logic, що дозволяє підвищити гнучкість та спростити процес налагодження запропонованої системи.

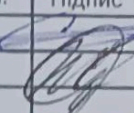
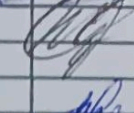
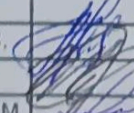

					08-16.МКР.007.00.000			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом Актуальність, мета, об'єкт та предмет дослідження.	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив		Сілагін О.Г.		15.11.22				
Перевірів		Жуков О.А.		15.11.22				
Т. контр.								
Рецензент		Бабенко О.В.		19.12.22		Аркуш 1	Аркушів 1	
Норм. кон				30.12.22	ВНТУ, гр. ЕПА-21м			
Затверд.		Мошноріз М М		30.12.22				

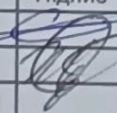
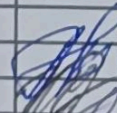
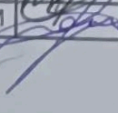

					08-16.МКР.007.00.000 Е1			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом Схема електрична структурна	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив	Сілагін О.Г.			13.11.22				
Перевірів	Жуков О.А			15.11.22				
Т. контр.								
Рецензент	Бабенко О.В.			19.12.22		Аркуш 1		Аркушів 1
Норм. кон.				30.12.22	ВНТУ, гр. ЕПА-21м			
Затверд.	Мошноріз М М			30.12.22				

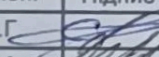



					08-16.МКР.007.00.000			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом Структура регулятора системи автоматичного керування ВЕК	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив	Сілагін О.Г.			18.11.22				
Перевірів	Жуков О.А.			15.11.22				
Т. контр.								
Рецензент	Бабенко О.В.			19.12.22				
Норм.кон.				30.12.22				
Затверд.	Мошноріз М.М.			30.12.22				
						Аркуш 1	Аркушів 1	
						ВНТУ, гр. ЕПА-21м		

					08-16.МКР.007.00.000			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом. Структура регулятора системи автоматичного керування ВЕК із блоком нечіткого логічного висновку	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив	Сілагін О.Г.			15.11.22				
Перевірив	Жуков О.А.			15.11.22				
Т. контр.								
Рецензент	Бабенко О.В.			19.12.22		Аркуш 1		Аркушів 1
Норм.кон				30.12.22	ВНТУ, гр. ЕПА-21м			
Затверд.	Мошноріз М.М.			30.12.22				

					08-16.МКР.007.00.000			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом. Комп'ютерна модель системи автоматичного керування БЕК в Matlab Simulink	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив	Сілагін О.Г.			15.11.22				
Перевірів	Жуков Є.А.			15.11.22				
Т. контр.								
Рецензент	Бабенко О.В.			19.12.22		Аркуш 1		Аркушів 1
Норм. кон.				30.12.22	ВНТУ, гр. ЕПА-21м			
Затверд.	Мошноріз М.М.			30.12.22				

					08-16.МКР.007.00.000			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом. Результати моделювання системи автоматичного керування струмом збудження ВЕК	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив	Сілагін О.Г.			15.11.22				
Перевірів	Жуков О.А			15.11.22				
Т. контр.								
Рецензент	Бабенко О.В.			19.12.22		Аркуш 1		Аркушів 1
Норм. кон				30.12.22	ВНТУ, гр. ЕПА-21м			
Затверд.	Мошноріз М М			30.12.22				

					08-16.МКР.007.00.000 Е2					
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом			Літ.	Маса	Масштаб
Розробив		Сілагін О.Г.		15.11.22	Схема електрична функціональна					
Перевірів		Жуков О.А.		15.11.22						
Т. контр.										
Рецензент		Бабенко О.В.		19.12.22				Аркуш 1	Аркушів 1	
Норм. кон.				30.12.22				ВНТУ, гр. ЕПА-21м		
Затверд.		Мошноріз М.М.		30.12.22						

					08-16.МКР.007.00.000			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом. Висновки.	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив		Сілагін О.Г.		15.11.22				
Перевіряв		Жуков О.А.		15.11.22				
Т. контр.								
Рецензент		Бабенко О.В.		19.12.22		Аркуш 1	Аркушів 1	
Норм.кон.				30.12.22	ВНТУ, гр. ЕПА-21м			
Затверд.		Мошноріз М.М.		30.12.22				

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ**

Назва роботи: Підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-21м

Науковий керівник: к.т.н., доц. Жуков О.А.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність	84,2%
Схожість	15,8%

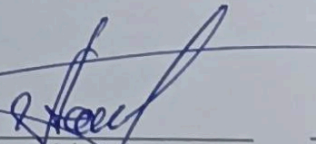
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

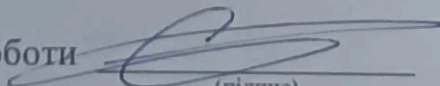
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Паянок О.А.
(прізвище, ініціали)

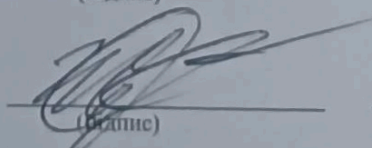
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Сілагін О.Г.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Жуков О.А.
(прізвище, ініціали)