

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки  
(повна назва)

## АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Автоматизація процесу управління вітроенергетичною установкою  
(тема)

Виконав: студент 2 курсу, гр. КІТПВм-19-1  
Ігнатов М.В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація  
та комп'ютерно-інтегровані технології

освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані  
технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Омаров М.А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
	(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

## ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Ігнатову Марку Віталійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Автоматизація процесу управління вітроенергетичною установкою

затверджена наказом по університету від \_\_\_\_\_ 02.11. 2020 р. № 1511 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 26.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Використання методу імітаційного (програмного) моделювання

3.2 Пакет MATLAB / Simulink

3.3 Дослідити різні способи регулювання

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

4.1 Вступ

4.2 Аналіз методів управління вітроенергетичною установкою

4.3 Розробка комп'ютерної моделі вітроенергетичної установки для імітаційного моделювання

4.4 Синтез комп'ютерної моделі ВЕУ для імітаційного моделювання

4.5 Дослідження комп'ютерної моделі оптимального способу управління потужністю ВЕУ

4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt) – с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Провести аналіз літератури за темою роботи	07.11.2020	Виконано
2	Виконати розробку комп'ютерної моделі вітроенергетичної установки для імітаційного моделювання	12.11.2020	Виконано
3	Провести математичний опис вітроколеса ВЕУ	15.11.2020	Виконано
4	Розробити математичну модель накопичувача електричної енергії	21.11.2020	Виконано
5	провести дослідження комп'ютерної Моделі оптимального способу управління потужністю ВЕУ	30.11.2020	Виконано
6	Провести розрахунки з охорони праці	03.11.2020	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	15.12.2020	Виконано
8	Подання роботі до ЕК	26.12.2020	

Дата видачі завдання 02.11.2020 року

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ігнатов М.В.  
\_\_\_\_\_  
( прізвище, ініціали)  
проф. Омаров М.А..  
\_\_\_\_\_  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 66 с., 27 рис., 1 дод., 20 джерел.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА,  
ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, УПРАВЛІННЯ, ШВИДКІСТЬ ВІТРУ.

Об'єкт дослідження – процес впровадження систем керування електротехнічним комплексом вітроенергетичної установки.

Предмет дослідження – рішення впровадження систем керування електротехнічним комплексом вітроенергетичної установки.

Мета атестаційної роботи – економія електроенергії шляхом розробки комп'ютерної моделі вітроенергетичної установки.

В результаті роботи з розробки комп'ютерних моделей для імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink була створена універсальна модель вітроенергетичної установки, яка складається з таких модулів: модуль генерації вітрової дії, що виконує функцію джерела енергії для роботи вітроенергетичної установки; модуль вітродвигуна вітроенергетичної установки, який перетворює енергію вітру в механічну енергію обертання валу вітроколеса; модуль електричного генератора, який перетворює механічну енергію обертання валу в електричну енергію; модуль універсального контролера вітроенергетичної установки, що забезпечує роботу ВЕУ за заданим алгоритмом, і призначення для дослідження різних алгоритмів і способів управління потужністю вітроенергетичної установки; модуль акумуляторної батареї, що виконує функцію буферного накопичувача електричної енергії.

## ABSTRACT

Explanatory note: 66 pp., 27 figs., 1 appendix, 20 sources.

AUTOMATION, WIND POWER INSTALLATION, SIMULATION  
MODELING, CONTROL, WIND SPEED.

The object of research is the process of introduction of the systems used for navigating an electrical complex based on a wind power plant..

The subject of research is the solution of the introduction of the systems used for navigating an electrical complex based on a wind power plant.

The purpose of the dissertation is power saving through the development of a computer model of a wind power plant.

As a result of work on development of computer models for simulation modeling in the MATLAB/Simulink environment the universal model of wind power plant which consists of such modules was created: the module of generation of wind action performing function of a power source for work of wind power plant; wind turbine engine module, which converts wind energy into mechanical energy of rotation of the windmill shaft; an electric generator module that converts the mechanical energy of the shaft rotation into electrical energy; the module of the universal controller of the wind power plant, which provides the operation of wind turbines according to a given algorithm, and the purpose for the study of various algorithms and methods of controlling the power of the wind power plant; a battery module that acts as a buffer storage of electrical energy.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз методів управління вітроенергетичною установкою .....	11
1.1 Напрямок розвитку малої енергетики .....	11
1.2 Управління потужністю вітроенергетичних установок.....	12
1.2.1 Управління потужністю при постійній частоті обертання.....	14
1.2.2 Управління потужністю ступінчастою зміною частоти обертання вітроколеса при перемиканні обмоток генератора.....	15
1.2.3 Управління потужністю ВЕУ зміною передавального відношення редуктора-мультиплікатора вітродвигуна.....	16
1.2.4 Управління потужністю ВЕУ зміною установчого кута лопатей або геометричних розмірів вітроколеса.....	17
1.2.5 Робота ВЕУ при змінній частоті обертання вітроколеса.....	19
1.3 Постановка задач.....	20
1.6 Висновки до першого розділу.....	21
2 Розробка комп'ютерної моделі вітроенергетичної установки для імітаційного моделювання .....	22
2.1 Модель вітру як джерела енергії для ВЕУ.....	25
2.2 Математичне опис вітроколеса ВЕУ.....	28
2.3 Опис моделі електричного генератора ВЕУ.....	30
2.4 Висновки по другому розділу.....	36
3 Розробка керуючої моделі .....	37
3.1 Розробка керуючої моделі контролера.....	37
3.2 Математична модель накопичувача електричної енергії.....	43
3.3 Синтез комп'ютерної моделі ВЕУ для імітаційного моделювання.....	45
3.4 Висновки по третьому розділу роботи.....	47

4 Дослідження комп'ютерної моделі оптимального способу управління потужністю ВЕУ.....	48
4.1 Дослідження різних способів регулювання.....	48
4.2 Робота при постійній частоті обертання.....	51
4.3 Охорона праці.....	58
4.4 Висновки по четвертому розділу роботи.....	62
Висновки.....	63
Перелік джерел посилань.....	65
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	68

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АКБ – акумуляторна батарея;

ВЕУ – вітроенергетична установка;

ДСТУ – Державний стандарт України;

ЕРС – електрорушійна сила;

ЗП – зарядні пристрої;

КВЕВ – коефіцієнт використання енергії вітру;

КПО – коефіцієнт природної освітленості;

СОС – модель ємності стану заряду.

## ВСТУП

Енергія вітру давно служить людині. Питання про її використання сьогодні є особливим, при зростанні дефіциту природного палива.

Вітроенергетика має високий потенціал використання у сільському господарстві, так як вітрові станції доцільно ставити на відкритих місцевостях, де швидкість вітру не менше 5 м/с. Також вітрові станції ставлять у горах та прибережних зонах де вітер є досить сильним та стабільним. До переваг відносять, повну відсутність сировини та відходів. Головним їх недоліком є зміна вітру та викликання певного дискомфорту, саме тому потрібно їх встановлювати подалі від місць проживання, як людей так і тварин.

Розрізняють станції з горизонтальним та вертикальним валом. Найбільше поширення з мережних установок сьогодні одержали ВЕУ з одиничною потужністю від 100 кВт до 500 кВт.

ВЕУ мегаватного класу побудовані в ряді країн і на сьогоднішній день перебувають у стадії експериментальних чи досліджень досвідченої експлуатації.

В багатьох розвинутих країнах існують державні програми розвитку поновлюваних джерел енергії, у тому числі і вітроенергетики. До цих програм відносять створення повноцінних науково-дослідних підрозділів та фінансова підтримка. Таким чином, тема атестаційної роботи «Автоматизація процесу управління вітроенергетичною установкою» є актуальною.

Об'єкт дослідження – електротехнічний комплекс на основі вітроенергетичної установки.

Предмет дослідження – вплив різних режимів управління вітроенергетичної установкою в умовах змінної швидкості вітру на її продуктивність.

Мета атестаційної роботи – розробка комп'ютерної моделі вітроенергетичної установки у вигляді імітаційного моделювання для автоматизації процесу управління.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати розробку комп'ютерної моделі вітроенергетичної установки для імітаційного моделювання;

- провести математичний опис вітроколеса ВЕУ;

- розробити математичну модель накопичувача електричної енергії;

- провести дослідження комп'ютерної моделі оптимального способу управління потужністю ВЕУ.

- оформити атестаційну роботу магістра згідно ДСТУ 3008:2015 [1] та методичними вказівками з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» [2].

## 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ

### 1.1 Напрямок розвитку малої енергетики

З урахуванням вимог ринку до низької вартості ВЕУ малої потужності, система управління потужністю зазвичай є максимально простою. Для цього зазвичай ВЕУ розраховують на задану швидкість вітру, при цьому частота обертання генератора обирається постійною. Це дозволяє використовувати простий асинхронний генератор, підключений до електричної мережі, або синхронний генератор з порушенням від постійних магнітів для зарядки акумуляторної батареї в автономних ВЕУ.

Лопасні вітроколеса зазвичай нерухомі, що не дозволяє регулювати кут установки та налаштувати частоту обертання під швидкість вітру. У разі вітрів, що відрізняються від розрахункових, обмеження потужності виробляється відведенням вітроколеса з-під вітру. Це не дозволяє в повній мірі використовувати весь діапазон швидкостей вітру і забезпечити працездатність ВЕУ в будь-яку погоду.

З розвитком вітроенергетичних установок і збільшенням їх потужності також відбувається і вдосконалення їх конструкції. У той час, як удосконалюються механічні частини конструкції ВЕУ, поліпшуються і ускладнюються електричні системи управління і контролю.

З'являється управління кутом установки лопастей, що дозволяє забезпечити роботу ВЕУ в штормових умовах обмеженням частоти обертання ротора. Також це дозволяє в деякій ступінь збільшити вироблення електричної енергії при малих вітрах.

Іншим способом поліпшити споживчі властивості ВЕУ є забезпечення працездатності турбін при різній швидкості вітру застосуванням різних редукторів і коробок передач.

У вітроенергетичних установках стали застосовуватися різні типи генераторів, де за допомогою електричних перетворень досягалась необхідна якість енергії, що генерується.

## 1.2 Управління потужністю вітроенергетичних установок

На сучасному етапі розвитку науки і техніки електротехнічні системи, засновані на поновлюваних джерелах енергії, з-стоять з великого числа взаємопов'язаних елементів і підсистем. Для дослідження таких систем зазвичай потрібно застосування досить потужного математичного апарату, заснованого на використуванні обчислювальних ресурсів електронних обчислювальних машин і його реалізації відповідним програмним забезпеченням. У міру розвитку програмного забезпечення для наукових розрахунків і збільшення потужності засобів обчислювальної техніки для наукових досліджень на комп'ютерах все частіше і частіше використовуються спеці-ні програми для математичних розрахунків, наприклад Mathcad. Такі програми дозволяють швидко реалізувати математичні моделі використовуючи прийоми модельно-орієнтованого програмування. Переходячи до дослідження систем електропостачання, заснованих на поновлюваних джерелах енергії, слід виділити деякі особливості функціонування таких систем. У відновлюваній енергетиці джерела енергії не можуть забезпечити сталість потужності, тому в таких системах потрібно накопичення виробленої енергії для подальшої її віддачі споживачеві, коли це необхідно.

У зв'язку з тим, що на сьогоднішній день існує безліч різних конструкцій вітродвигунів, виникає ряд питань:

- наскільки ефективні ці конструкції;
- наскільки повно використовується потенціал, закладений в конкретну конструкцію;

– чи є можливість збільшити ефективність такої ВЕУ, не вносячи істотних змін в конструкцію.

Провівши аналіз було визначено, що всі конструкції ВЕУ можна поділити наступним чином:

- з горизонтальною віссю обертання;
- з вертикальною віссю обертання.

ВЕУ з горизонтальною віссю обертання можна розділити на:

- з постійним інсталяційний кутом лопатей;
- із змінним інсталяційний кутом лопастей.

ВЕУ з вертикальною віссю обертання можна розділити на:

- з постійною геометрією вітроколеса;
- із змінною геометрією вітроколеса.

При цьому можна виділити наступні основні способи управління потужністю вітроенергетичної установки:

- ВЕУ, що працює при постійній частоті обертання вітроколеса;
- ВЕУ, що працює при декількох фіксованих частотах обертання вітроколеса шляхом перемикавання обмоток генератора;
- ВЕУ, що працює при декількох фіксованих частотах обертання вітроколеса шляхом перемикавання передавального відносини мультиплікатора;
- ВЕУ, що працює при змінній частоті обертання зі зміною установчого кута лопатей вітроколеса або зміною геометричних розмірів вітроколеса;
- ВЕУ, що працює при змінній частоті обертання з регулятором потужності.

Необхідність регулювання потужності в вітроенергетичної установки можна пояснити особливістю аеродинамічної характеристики вітроколеса.

На рисунку 1.1 показана типова залежність аеродинамічної потужності вітроколеса від частоти обертання для різних швидкостей вітру.

При цьому видно, що для кожної швидкості вітру існує певна частота обертання, при якій потужність вітроколеса максимальна.

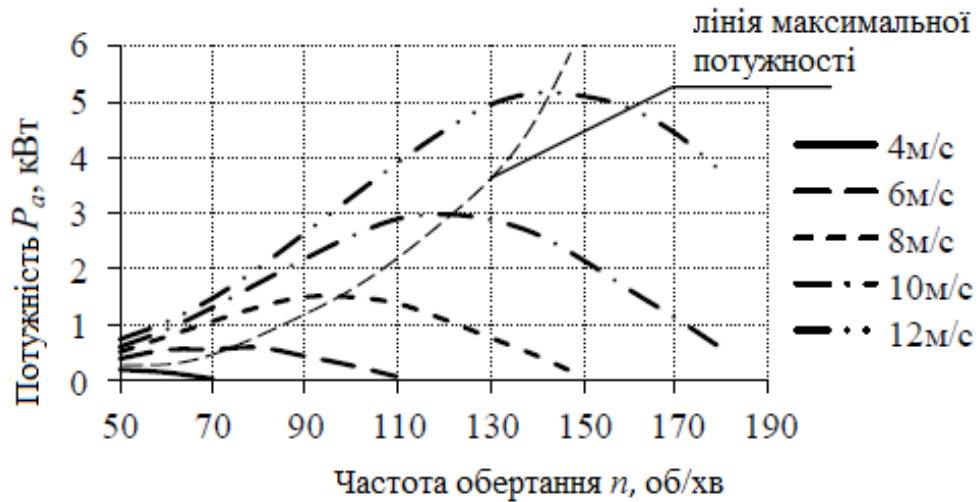


Рисунок 1.1 – Залежність генерується від частоти обертання вітроколеса для різних швидкостей вітру

### 1.2.1 Управління потужністю при постійній частоті обертання

Найбільш простим в реалізації є спосіб управління потужністю при постійній частоті обертання. Як приклад використання такого способу можна навести конструкцію ВЕУ, в якій ротор вітроколеса безпосередньо або через мультиплікатор з'єднаний з ротором синхронного генератора з перемиканням від постійних магнітів. Обмотки генератора підключені до входу діодного випрямного моста, вихід якого під-укладений до акумуляторної батареї.

При роботі такої ВЕУ при зміні швидкості вітру змінюється напруга на виході генератора і випрямляча відповідно. Таким чином, при малих вітрах частота обертання і вихідна напругу стає нижче напруги на акумуляторної батареї, струм в АКБ перестає текти, що призводить до зменшення зниження електромагнітного моменту генератора на валу вітроколеса. При збільшенні швидкості вітру частота обертання генератора прагне збільшитися, що призводить до збільшення вихідної напруги генератора і зростання струму в акумуляторну батарею. Збільшення струму призводить до збільшення електромагнітного моменту генератора на валу

вітроколеса, що не дозволяє йому розганятися вище певної частоти обертання, чим і досягається стабілізація.

Переваги способу управління потужністю при постійній частоті обертання:

- цей спосіб не вимагає таких агрегатів, як коробка передач або механізм зміни установочного кута лопатей, що дозволяє спростити конструкцію вітроколеса, при цьому збільшивши її надійність;

- спосіб забезпечує можливість застосування генератора з збудженням від постійних магнітів, що дозволяє підвищити ККД генератора і всієї вітроенергетичної установки в цілому, тому що такий генератор не вимагає електричної енергії на збудження магнітного поля;

- можливість застосування простої схеми перетворення електричного струму генератора в постійний струм заряду акумуляторної батареї за допомогою діодного випрямного моста дозволяє спростити електрообладнання вітроенергетичної установки і зменшити вартість кінцевого виробу.

Недоліки цього способу:

- ефективна робота ВЕУ забезпечується тільки у вузькому діапазоні швидкостей вітру;

- необхідно застосовувати спеціальні заходи для захисту від перевищення потужності при швидкості вітру, що перевищує номінальну.

### 1.2.2 Управління потужністю ступінчастою зміною частоти обертання вітроколеса при перемиканні обмоток генератора

Наступним за складністю реалізації є спосіб управління потужністю ступінчастою зміною частоти обертання ротора шляхом перемикання обмоток генератора. Цей спосіб подібний до способу управління потужністю при постійній частоті обертання вітроколеса, відрізняючись тим, що в залежності від швидкості вітру конструкція вітроенергетичної установки дозволяє змінювати вихідну напругу генератора, що дозволяє забезпечити

роботу вітроколеса з частотою обертання, змінною в залежності від швидкості вітру, що дозволяє забезпечити ефективну роботу при декількох швидкостях вітру.

Переваги способу:

- спосіб дозволяє істотно розширити діапазон швидкостей вітру, при яких можливе ефективне функціонування ВЕУ;

- використання такого способу дозволяє зберегти простоту електричного перетворювача вітроенергетичної установки, пере-виклавши функції виконавчого пристрою системи управління ВЕУ на електромеханічний комутатор обмоток генератора.

Недоліки способу:

- для забезпечення функціонування такого способу в системі управління вітроенергетичної установки потрібно вимір швидкості вітру за допомогою анемометра, або визначення цієї величини за непрямими ознаками, наприклад за величиною кутового прискорення швидкості вітру;

- застосування пристрою комутації обмоток генератора приводить до зниження надійності електрообладнання вітроенергетичної установки;

- в порівнянні зі способом управління потужністю ВЕУ при постійній частоті обертання вітроколеса зберігає необхідність застосування спеціальних захисних засобів для обмеження потужності генератора при швидкостях вітру, що перевищують номінальну.

### 1.2.3 Управління потужністю ВЕУ зміною передавального відношення редуктора-мультиплікатора вітродвигуна

Ще одним способом регулювання частоти обертання ротора вітроколеса під змінюється швидкість вітру є застосування механічній передачі між валом вітроколеса і валом електричного генератора зі змінним або східчасто змінним передавальним відношенням. Як приклад таких пристроїв можна привести редуктор / мультиплікатор з декількома передачами (коробка передач), або клиноремінний варіатор.

Цей спосіб аналогічно попередньому способу дозволяє розширити діапазон швидкостей вітру, дозволяючи при цьому використовувати досить прості синхронні генератори, розраховані на фіксовану частоту обертання.

Переваги способу:

- застосування механічної передачі зі змінним передавальним відношенням дозволяє істотно розширити діапазон швидкостей вітру, при яких можливе ефективне функціонування ВЕУ;

- використання такого способу дозволяє зберегти простоту електричного перетворювача вітроенергетичної установки, пере-виклавши функції виконавчого пристрою системи управління ВЕУ на керовану коробку передач.

Недоліки способу:

- для забезпечення функціонування такого способу в системі управління вітроенергетичної установки потрібне застосування анемометра, або іншого пристрою визначення поточної швидкості вітру;

- застосування пристрою зміни передач призводить до зниження надійності механічної передачі від вітроколеса до генератора вітроенергетичної установки;

- застосування пристрою зміни передач призводить до збільшення механічних втрат в тракці «вітроколесо-генератор», знижую загальну ефективність вітроенергетичної установки;

- зберігається необхідність застосування спеціальних захисних засобів для обмеження потужності генератора при швидкостях вітру, перевищувати номінальну.

#### 1.2.4 Управління потужністю ВЕУ зміною установочного кута лопатей або геометричних розмірів вітроколеса

Одним із способів адаптації властивостей вітроколеса можна назвати спосіб управління потужністю ВЕУ шляхом зміни установочного кута лопастей або геометричних розмірів вітроколеса.

Застосування цього способу передбачається застосування такої конструкції вітроколеса, в якій можливо автоматична зміна аеродинамічних поверхонь, що приводить до зміни аеродинамічних характеристик вітроколеса у відповідність з змінною швидкістю вітру. Така конструкція зазвичай потребує оснащення вітроколеса різними агрегатами для здійснення функції управління.

Переваги способу:

- застосування механізованої конструкції вітроколеса дозволяє найбільш повно використовувати енергію вітру в широкому діапазоні робочих швидкостей;

- використання такого способу дозволяє забезпечити аеродинамікою-чеський регулювання потужності ВЕУ, забезпечуючи найбільш сприятливих режимах експлуатації, включаючи забезпечення захисту генератора ВЕУ від надлишкової потужності в умови сильних вітрів.

Недоліки способу:

- для забезпечення функціонування такого способу в системі управління вітроенергетичної установки потрібне застосування складність даної системи управління механічними пристроями і агрегатами для зміни геометрії аеродинамічних поверхонь вітроколеса [17];

- застосування механічних пристроїв або агрегатів для вимірювати геометрії аеродинамічних поверхонь вітроколеса призводить до зниження надійності конструкції вітроенергетичної установки, призводить до необхідності забезпечення технічного обслуговування в процесі експлуатації ВЕУ;

- ускладнення конструкції ВЕУ призводить до збільшення вартості як вітроенергетичної установки, так і експлуатаційних витрат що несприятливо позначається на економічній ефективності.

### 1.2.5 Робота ВЕУ при змінній частоті обертання вітроколеса

В умовах постійно мінливих швидкості вітру і незмінних геометричних розмірах аеродинамічних поверхонь вітроколеса можна виявити, що найбільша ефективність вітроколеса досягається при зміні частоти обертання ротора вітроколеса відповідно до визначеної закономірності. Зазвичай така закономірність задається за допомогою терміну «швидкохідні» - відносини лінійної швидкості кінця лопаті до швидкості вітру. Для кожної конструкції вітроколеса зі своїми геометричними розмірами існує певне значення швидкохідності, при якій вітроколесо забезпечує найбільшу ефективність. І для забезпечення ефективної роботи ВЕУ потрібно постійно підтримувати цю швидкохідність на необхідному рівні, змінюючи частоту обертання ротора вітроколеса слідом за зміною швидкістю вітру.

При цьому слід зазначити, що при змінній частоті обертання валу вітроколеса і генератора відповідно (при прямому з'єднанні валу вітроколеса та валу електричного генератора), синхронний генератор з порушенням від постійних магнітів буде виробляти електричний струм, що змінюється по частоті і по амплітуді.

Такий перетворювач повинен забезпечувати перетворення змінного електричного струму генератора в постійний струм заданої величини для забезпечення такого режиму роботи ВЕУ, щоб потужність навантаження генератора забезпечувала необхідну частоту обертання вітроколеса при заданій швидкості вітру.

Переваги способу:

- застосування електричного регулювання швидкості обертання вітроколеса дозволяє забезпечити ефективну роботу ВЕУ в широкому діапазоні швидкостей вітру;

- використання цього способу дозволяє зберегти простоту конструкції вітроенергетичної установки, переклавши функції виконуючого пристрою системи управління ВЕУ на електричний перетворювач;

– застосування керованого електричного перетворювача дозволяє забезпечити захист електричного генератора від перевантаження в умовах надмірно високих швидкостей вітру, наприклад при виникненні буремних вітрів або штормів.

Недоліки способу:

– для забезпечення функціонування такого способу в системі управління вітроенергетичної установки потрібне застосування анемометра, або іншого пристрою визначення поточної швидкості вітру;

– застосування регульованого електричного перетворювача приводить до ускладнення електричної частини конструкції ВЕУ, висуваючи високі вимоги до надійності електрообладнання, проте в зв'язку з тим, що електронна промисловість безперервно розвивається, пропонуючи все більш ефективні і високонадійні рішення, можна прогнозувати, що в найближчому майбутньому можлива поява ефективних конструкцій, успішно вирішують поставлену задачу.

### 1.3 Постановка задач

Мета атестаційної роботи – розробка комп'ютерної моделі вітроенергетичної установки у вигляді імітаційного моделювання для автоматизації процесу управління.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– виконати розробку комп'ютерної моделі вітроенергетичної установки для імітаційного моделювання;

– провести математичний опис вітроколеса ВЕУ;

– розробити математичну модель накопичувача електричної енергії;

– провести дослідження комп'ютерної моделі оптимального способу управління потужністю ВЕУ.

#### 1.4 Висновки до першого розділу

Аналізуючи описані вище способи управління потужністю ВЕУ можна зробити висновок, що найбільш простим і поширеним способом управління є робота при постійній частоті обертання вітроколеса. У той же час вітроенергетичні установки, що працюють при такому управлінні, не можуть забезпечити ефективне функціонування в широкому діапазоні швидкостей вітру і вимагають додаткових-них механізмів для захисту конструкції ВЕУ при надлишку вітрової потужності. Найбільш ефективним способом, що забезпечує роботу ВЕУ в широкому діапазоні швидкостей вітру, є робота при змінній частоті обертання вітроколеса за заданим алгоритмом, коли, при зміні швидкості вітру змінюється частота обертання вітроколеса, забезпечуючи роботу вітроколеса з найбільшою ефективністю. Для розробки такого алгоритму ефективного управління потужністю ВЕУ було прийнято рішення про розробку універсальної комп'ютерної моделі вітроенергетичної установки, яка імітує роботу ВЕУ під керуванням алгоритму, заданого на мові високого рівня.

Розглянуті способи управління застосовні до різних конструкції вітродвигуна вітроенергетичної установки, що дозволяє, сконцентрувавшись на вивченні способів управління, застосувати отриманий досвід на все різноманіття вітроенергетичних установок.

## 2 РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Використання методів імітаційного моделювання на етапі проектування складних систем управління дозволяє не тільки істотно скоротити витрати на дослідження, розробку і випробування, а й істотно зменшити час розробки виробу.

Домогтися підвищення ефективності процесу розробки і проектування систем управління складними об'єктами можна за рахунок при-трансформаційних змін імітаційного моделювання, що буде показано на при-міру розробки універсального контролера. При цьому модель системи управління повинна підтримувати програмування на мові високого рівня, щоб забезпечити програмі управління на цільову систему. Як середовище розробки і дослідження обрано пакет програм для математичних розрахунків MATLAB/Simulink.

Пакета MATLAB/Simulink дозволяє виробляти складні математичні обчислення з різними об'єктами: числами, векторами, матрицями, а також вирішувати системи рівнянь різної складності. Для полегшення процесу моделювання різних систем виконання використовуємо бібліотеку моделей різних пристроїв. При цьому запропоновані моделі містять математичний опис, наведений в документації до бібліотеки. Однак при розробці систем управління потрібні не тільки моделі об'єктів управління, але модель керуючого пристрою, а його складність зазвичай змінює-ся від завдання до завдання, що створює запит на застосування універсального підходу до розробки моделі керуючого пристрою.

Метою імітаційного моделювання обчислювального експерименту над комп'ютерними моделями є дослідження ефектності ВЕУ при використанні різних стратегій і алгоритмів управління.

Вітроенергетична установка зазвичай складається з перелічених далі компонентів

Вітродвигун – перетворювач енергії вітру в механічну енергію обертання. Вітродвигун включає в себе вітроколесо – елемент конструкції ВЕУ, що складається з лопатей, крил або інших частин, який сприймає потік, що набігає повітря і перетворює енергію цього потоку в обертальний рух, що передається на вал генератора або іншого пристрою використання механічної енергії

Електричний генератор – електрична машина, перетворююча механічну енергію обертання валу в електричну енергію. Генератори вітроенергетичних установок бувають різних типів, наприклад генератори постійного струму, асинхронні генератори, вентильні (синхронні) та інші. Тип генератора визначається розробником вітроенергетичної установки і вибирається з умов експлуатації, вимог до потужності і якості генерується електричної енергії.

Контролер заряду акумуляторної батареї – пристрій, призначений для підтримки струму і напруги, необхідного для заряду акумуляторних батарей. Контролер заряду акумуляторної батареї регулює значення струму і напруги на вході і на виході, забезпечує оптимальний режим заряду акумуляторів.

Інвертор – пристрій, що перетворює напругу постійного струму в напругу змінного струму. Акумуляторні батареї є джерелом напруги постійного струму, а більшість споживачів електроенергії навпаки розраховані на змінну напругу 220 В або 380 В при частоті 50 Гц. Часто інвертори об'єднують кілька функцій: перетворюють постійний струм в змінний, є контролерами заряду; забезпечують захист акумуляторної батареї від перезаряду і перерозряду; виконують роль навантаження для генератора. Існують два типи інверторів, що відрізняються за якістю змінного струму: з синусоїдальним вихідним напругою і, так званої, «модифікованою синусоїдою».

Перші відрізняються більш високою вартістю, але дозволяють живити будь-які навантаження, чутливі до якості електроенергії.

Другі відрізняються меншою вартістю, але не призначені для живлення індуктивного навантаження: пристрої з електродвигунами та трансформаторами. Акумуляторні батареї – пристрої, призначені для накопичення електроенергії. У системах, заснованих на поновлюваних джерелах енергії, як правило, застосовуються свинцево-кислотні необслуговувані акумуляторні батареї типу AGM – з абсорбованим електролітом. Такі батареї здатні до досить глибокого розряду без втрати якості і розраховані на велику кількість циклів заряду / розряду.

Для формування вимог до універсальної комп'ютерної моделі вітроенергетичної установки потрібно визначити граничні умови застосовності моделі.

Основною характеристикою, що впливає на ефективність ВЕУ, є коефіцієнт використання енергії вітру (КВЕВ, далі в формулах і на рисунках позначений як) – відношення механічної потужності вітроколеса до повної потужності енергії вітру.

Комп'ютерна модель вітроенергетичної установки була розроблена з наперед заданим КВЕВ вітродвигуна і універсальним контролер для забезпечення можливості зміни алгоритму управління, функціональна схема моделі приведена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Функціональна схема імітаційної моделі вітроенергетичної установки

Можна виділити наступні способи управління, що застосовуються в різних типах ВЕУ, які підтримуються комп'ютерною моделлю:

- ВЕУ, що працює при постійній частоті обертання вітроколеса;
- ВЕУ, що працює при декількох фіксованих частотах обертання вітроколеса шляхом перемикавання обмоток генератора;
- ВЕУ, що працює при декількох фіксованих частотах обертання вітроколеса шляхом перемикавання передавального відношення мультиплікатора;
- ВЕУ, що працює при змінній частоті обертання і використовує електричний перетворювач з регулятором потужності.

Метою моделювання різних алгоритмів управління ВЕУ є визначення продуктивності ВЕУ при роботі під управлінням цих алгоритмів при різних зовнішніх впливах, а так само розробки та оптимізації нових алгоритмів в ході подальших досліджень і розробок, в тому числі натурних випробувань реальних об'єктів.

## 2.1 Модель вітру як джерела енергії для ВЕУ

При імітаційному моделюванні впливу вітру на різні об'єкти часто доводиться ставити зміна швидкості вітру від часу. Така необхідність виникає, наприклад, при дослідженні роботи вітроенергетичної установки в умовах впливу змінного вітру. Характер залежності швидкості вітру від часу істотно впливає на вибір способу управління швидкістю обертання вітроколеса і визначає вимоги до системи управління вітроенергетичної установки.

При імітаційному моделюванні енергетичної системи на основі вітроенергетичної установки в якості задає впливу на об'єкт управління використовується горизонтальна складова швидкості. Таким чином, необхідно розробити модель горизонтальної складової швидкості вітру, що

вимагає невисокі обчислювальні ресурси і придатною для реалізації в середовищі MATLAB / SIMULINK.

У нормативних і рекомендаційних документах зазвичай швидкість вітру представлена у вигляді суми двох складових:

$$V(t) = \bar{V} + \Delta V(t),$$

де  $\bar{V}$  – середнє значення швидкості вітру;

$\Delta V(t)$  – девіація швидкості вітру, так звана динамічна складова швидкості.

Нормативні документи містять вимоги до середньої швидкості вітру і її динамічної складової  $\Delta V(t)$ , які є випадковими процесами. Середня швидкість вітру  $\bar{V}$  зазвичай задається як функція часу. Статистичні характеристики динамічної складової  $\Delta V(t)$  задаються за допомогою функції спектральної щільності  $S(f)$ .

Для опису динамічної складової швидкості вітру зазвичай застосовують емпіричні моделі спектральної щільності  $S(f)$ , такі як функції Давенпорта, Кармана і Кайман [103].

Для розрахунку динамічної складової швидкості вітру була обрана модель спектральної щільності Кайман. Спектральні щільності динамічних складових для моделі Кайман описуються рівнянням:

$$\frac{f \cdot S(f)}{\sigma^2} = \frac{4 \cdot f \cdot L / \bar{V}}{(1 + 6 \cdot f \cdot L / \bar{V})^{5/3}},$$

де  $f$  – частота гармонійної складової сигналу швидкості вітру, Гц;

$S(f)$  – односторонній спектр горизонтальної складової швидкості вітру;

$\sigma$  – середньоквадратичне відхилення горизонтальної складової швидкості вітру;

$L$  – коефіцієнт турбулентності.

Використовуючи теорему Фур'є функцію горизонтальної складової швидкості вітру можна представити у вигляді ряду:

$$V(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k),$$

де  $A_k$  – амплітуда  $k$ -ї гармоніки швидкості вітру;  
 $\omega_k$  – кругова частота відповідної гармоніки;  
 $\varphi_k$  – фазовий зсув  $k$ -го коливання;  
 $A_0$  – ймовірність.

Тоді амплітуда  $k$ -ї гармоніки дорівнює її середньоквадратичному відхиленню:

$$A_k = \sqrt{S(f_k)\Delta f},$$

де –  $\Delta f$  інтервал між сусідніми частотами.

Підставивши відповідні значення, отримуємо, що горизонтальна швидкість вітру на тимчасовому інтервалі  $T$  дорівнює:

$$V(t) = \bar{V} + \sum_{k=1}^N A_k \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k),$$

де –  $\bar{V}$  швидкість вітру, усереднена на заданому інтервалі часу.

Таким чином, горизонтальна швидкість вітру може бути розрахована як сума відповідних гармонійних складових і середовищ-ній швидкості вітру, що дозволяє реалізувати її стандартними середовищами Matlab / Simulink.

## 2.2 Математичне опис вітроколеса ВЕУ

Модель вітроколеса представлена наступними диференціальним рівнянням для опису обертального руху вітроколеса:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_{\text{ем}} - M_c,$$

де  $J$  – момент інерції системи;

$\omega$  – кутова швидкість;

$M_a$  – аеродинамічний момент вітроколеса;

$M_{\text{ем}}$  – електромагнітний момент генератора;

$M_c$  – момент опору втрат, що враховує тертя та інші втрати.

Аеродинамічний момент ротора дорівнює:

$$M_a = C_p(Z) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2 \cdot \omega},$$

де  $C_p(Z)$  – КВЕВ (залежить від швидкохідності  $Z$ );

$\rho$  – щільність повітря;

$V$  – швидкість вітру;

$S$  – площа;

$\omega$  – кутова швидкість вітроколеса.

Тоді аеродинамічна потужність дорівнює

$$P_a = C_p(Z) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}.$$

Залежність від  $C_p$  швидкохідності  $Z$  досить добре апроксимує функцією виду:

$$C_p(Z) = \left(\frac{c_1}{Z} - c_2\right) \cdot e^{-\frac{c_3}{Z}} + c_4,$$

де  $C_1 \dots C_4$  – коефіцієнти, що підбираються для заданої конструкції вітроколеса за відомою аеродинамічній характеристик.

Графік залежності безрозмірного коефіцієнта  $C_p$  від швидкохідності (безрозм.) представлений на рисунку 2.2.

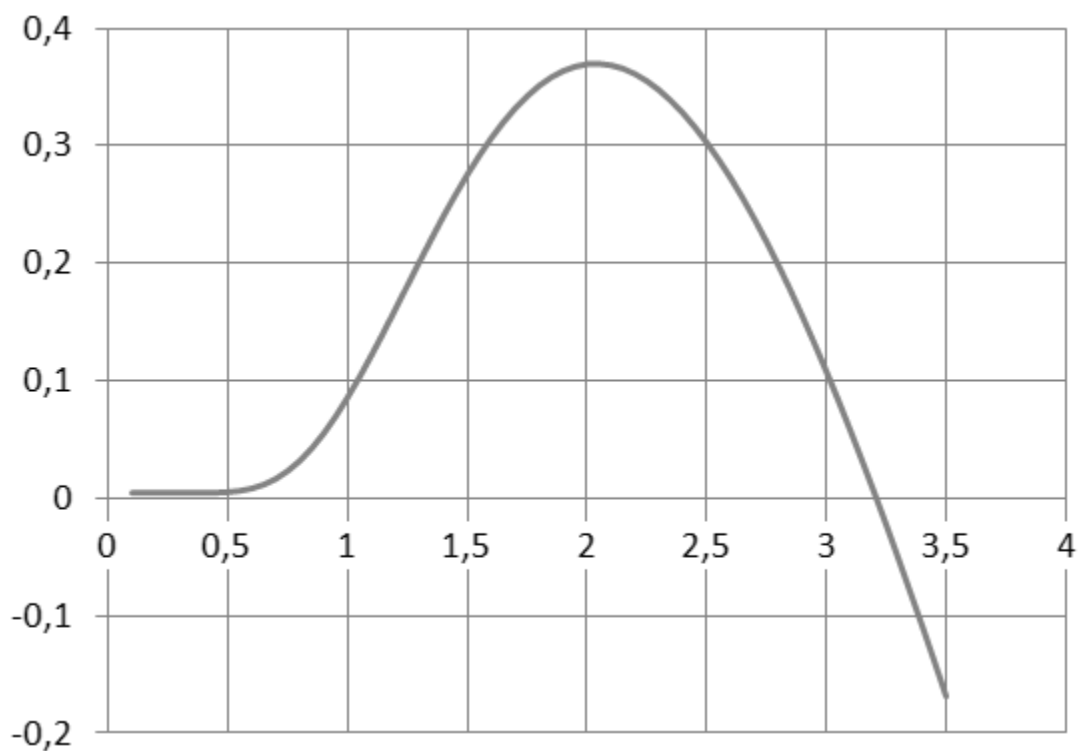


Рисунок 2.2 – Залежність КВЕВ від швидкохідності момент опору на валу

Грунтуючись на заданій залежності коефіцієнта використання енергії вітру від швидкохідності вітроколеса, була визначена залежність аеродинамічній потужності від швидкості вітру і частоти обертання ротора.

Графік розподілу аеродинамічній потужності ротора в звинності від швидкості вітру і частоти обертання представлений на рисунку 2.3.

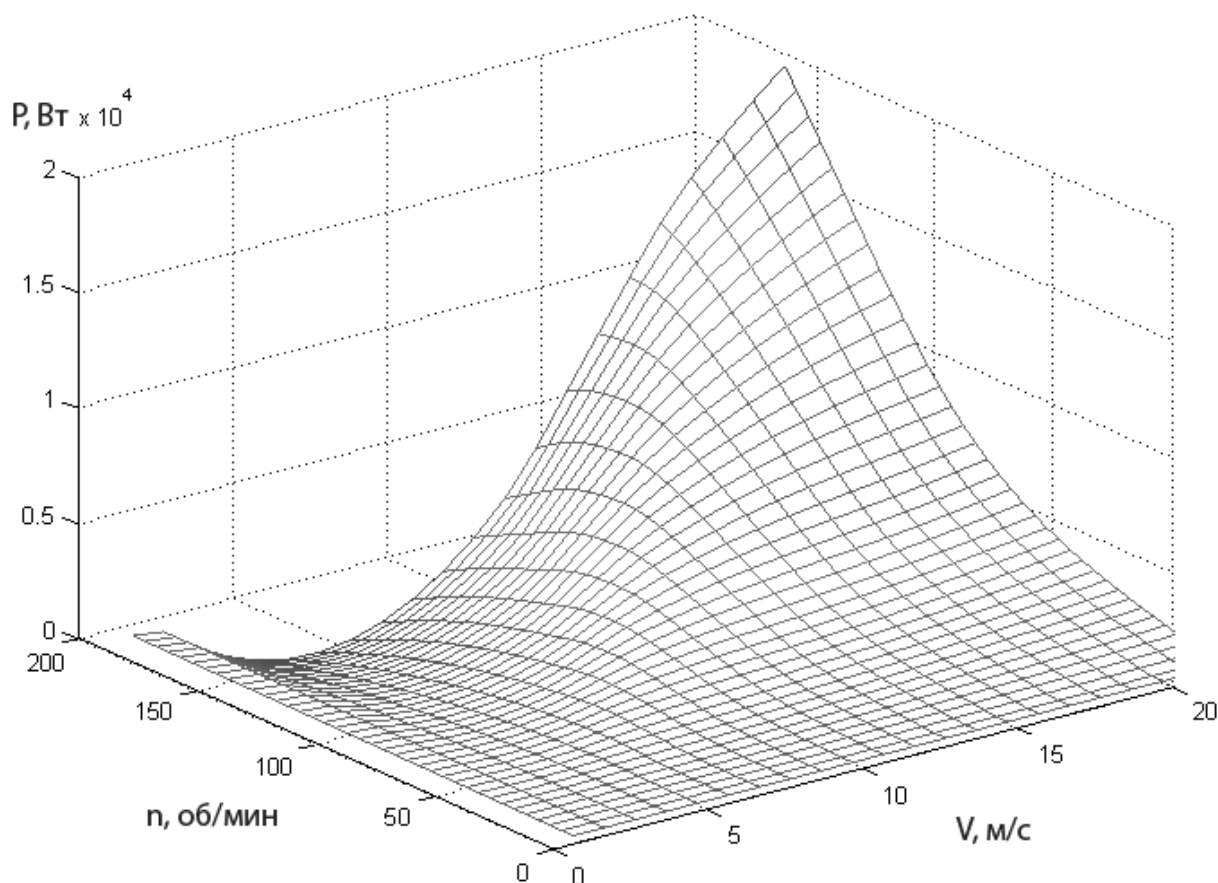


Рисунок 2.3 – Графік розподілу потужності ротора в залежності від швидкості вітру і частоти обертання

За цим графіком можна зробити висновок про те, що для будь-якої заданої швидкості вітру існує частота обертання ротора, при якій потужність вітроенергетичної установки буде максимальною.

### 2.3 Опис моделі електричного генератора ВЕУ

Для перетворення механічної енергії обертання валу вітродвигуна в електричну в вітроенергетичних установках використовуються електричні генератори.

До електричних генераторів, застосовуваних в вітроенергетичних установках, пред'являються особливі вимоги, що враховують особливості їх роботи. Одною з найважливіших особливостей є те, що генератор

приводиться в обертання вітроколесом, швидкісний режим якого залежить від швидкості вітру і є непостійним.

В умовах мінливої швидкості вітру необхідно забезпечення необхідних характеристик генератора в широкому діапазоні швидкостей обертання, що призводить до збільшення розмірів і маси електричної машини в порівнянні з генераторами, розрахованими на сталий режим роботи. Навантаження генератора теж змінюється в процесі роботи. Вона залежить від потужності і числа підключених споживачів.

При зміні швидкості обертання ротора генератора і змінному навантаженні необхідно стабілізувати напругу на виході генератора, що створює необхідність застосування пристрою регулювання напруги. Таке регулювання зазвичай здійснюється за рахунок зміни струму в спеціальній обмотці збудження, що задається регулятором напруги.

Застосування обмотки збудження призводить до необхідності збільшення габаритних розмірів. Також струм в обмотці збудження призводить додатковим електричним втратам в генераторі, іноді досягає величини в 10...20% від корисної потужності.

Таким чином, для застосування в вітроенергетичних установках малої потужності найбільш доцільно застосовувати синхронні електричні машини з збудженням від постійних магнітів.

Такі машини бувають з радіальним і осьовим магнітним потоком, при цьому можливі конструкції без використання магніто-м'яких матеріалів в сердцеве якоря, що дозволяє ще більше знизити втрати. Додатковою перевагою є зниження реактивного моменту генератора, що є важливим при застосуванні в таких електричних машин в вітроенергетичних установках, пульсації реактивного моменту зазвичай призводять до небажаної вібрації конструкції ВЕУ і виникнення шуму.

Істотно прискорити процес розробки електричної машини для вітроенергетичної установки допомагають сучасні засоби обчислювальної техніки і відповідне програмне забезпечення. На етапі розрахунку

електромагнітних параметрів і теплових розрахунків можливі застосування як інженерних методики для прискореного розрахунку та програмні пакети, засновані на методі кінцевих елементів.

На етапі проектування конструкції полегшує працю розробника тверде моделювання в системах автоматизованого проектування подібно SolidWorks.

Моделювання генератора вітроенергетичної установки проводиться на основі вивчення ряду особливостей електричної машини. Застосований генератор є синхронної електричної машиною з порушенням від постійних магнітів і з осьовим направленням магнітного потоку і безжелезним якорем, що містить статорні обмотки.

Особливістю проектування генератора з аксіальним зазором є відсутність втрат на перемагнічування через відсутність сталевого магнітопроводу і низька індуктивність обмоток, впливом якої в імітаційному моделюванні ВЕУ.

Для імітаційного моделювання алгоритмів управління потужностей ВЕУ з метою оптимізації вимог до обчислювальних ресурсів в рамках поставленої задачі запропонована наступна модель електричного генератора.

Виходячи зі схеми заміщення, напруга фазної обмотки генератора одно

$$u = e - r \cdot i - L \frac{di}{dt}$$

де  $e$  – електрорушійна сила (ЕРС);

$r$  – активний опір фазної обмотки;

$i$  – струм в фазній обмотці;

$L$  – індуктивність фазної обмотки.

Для зменшення впливу параметрів електричної машини на результати дослідження алгоритмів керування ВЕУ було прийнято, що  $i$  дорівнюють нулю, а ЕРС в обмотках генератора задається наступними рівняннями:

В системі рівнянь прийняті наступні позначення:

$$\begin{cases} e_A = k \cdot \omega \cdot \sin(2p \cdot \omega \cdot t) \\ e_B = k \cdot \omega \cdot \sin\left(2p \cdot \omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right), \\ e_C = k \cdot \omega \cdot \sin\left(2p \cdot \omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

де  $e_A, e_B, e_C$  – ЕРС відповідних обмоток генератора;

$k$  – коефіцієнт конструкції генератора;

$2p$  – число пар полюсів;

$\omega$  – кутова швидкість ротора генератора;

$t$  – час.

Рисунок 2.4 показує блок-схему моделі генератора в пакеті MATLAB / Simulink.

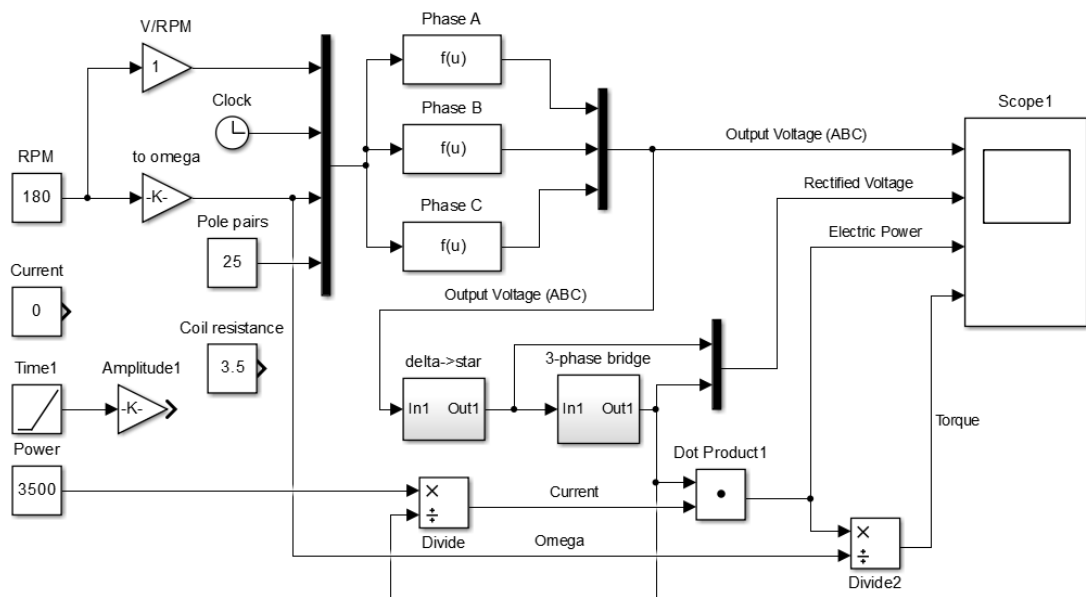


Рисунок 2.4 – Блок-схема моделі генератора

На рисунку 2.5 приведено блок-схему моделі розрахунку з'єднання обмоток генератора за схемою «зірка».

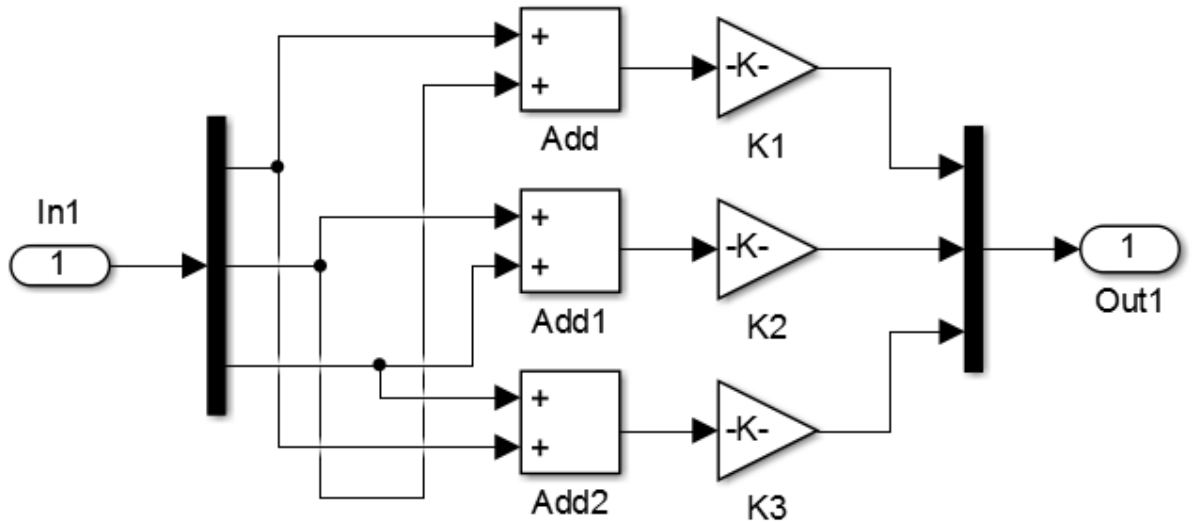


Рисунок 2.5 – Блок-схема моделі з'єднання обмоток «зіркою»

На рисунку 2.6 приведена блок-схема моделі розрахунку роботи трьох-фазного випрямного моста для імітації роботи генератора змінного струму на навантаження постійного струму.

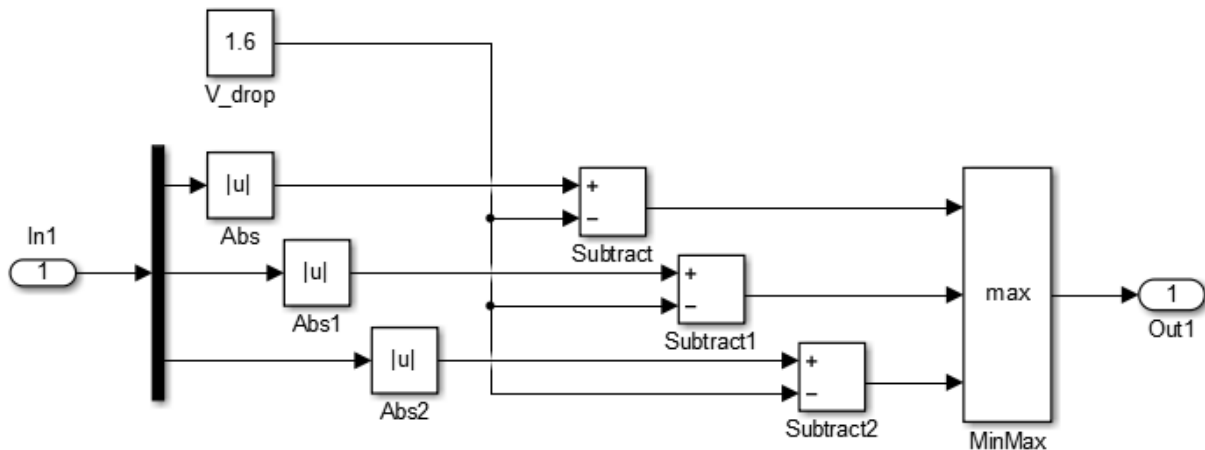


Рисунок 2.6 – Блок-схема моделі трифазного випрямного моста

На рисунку 2.7 наведено результат моделювання роботи генератора при частоті обертання валу 180 об/хв на холостому ході. Верхній графік

демонструє ЕРС в фазних обмотках генератора, а нижній графік – напруги на вході і виході випрямляча.

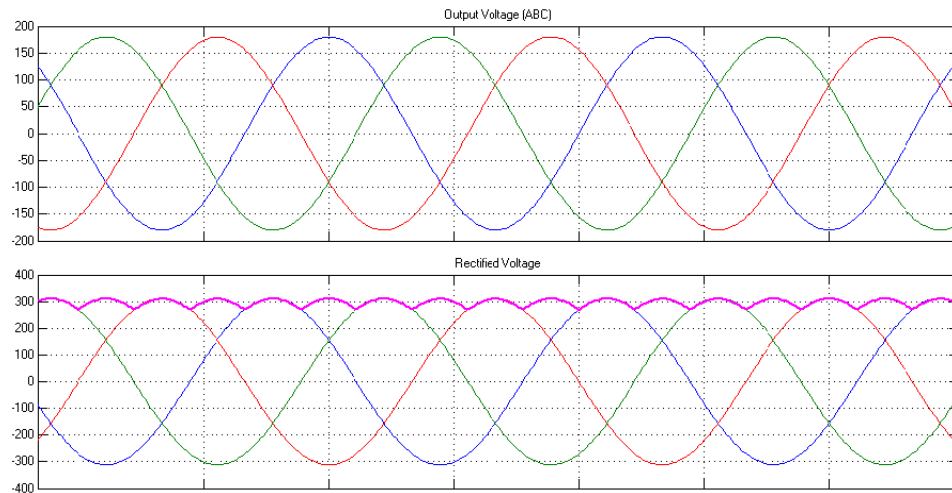


Рисунок 2.7 – Напруги на фазних обмотках і виході випрямляча

На рисунку 2.8 наведено результат моделювання роботи генератора при частоті обертання валу 180 об/хв і роботі на навантаження в 10 А. Верхній графік показує електричну потужність генератора, а нижній графік – пульсації електромагнітного моменту.

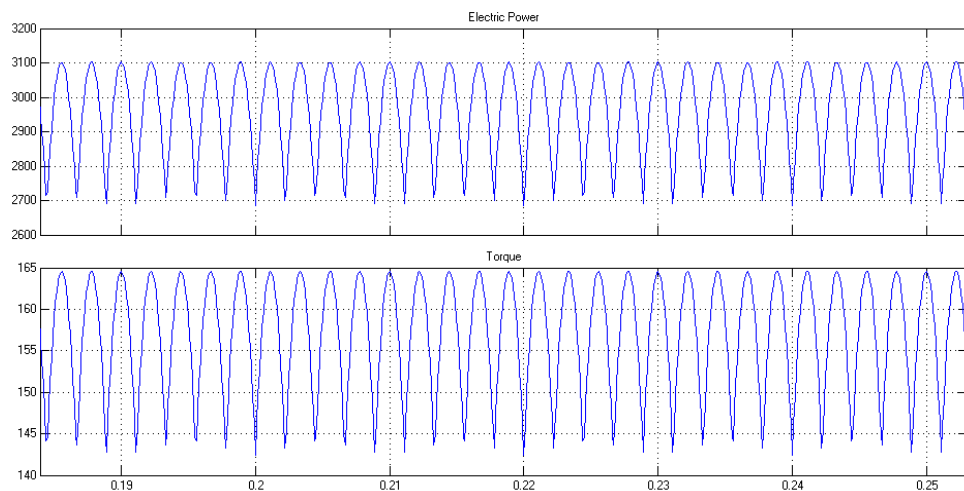


Рисунок 2.8 – Результат моделювання роботи генератора з трифазним випрямним мостом на навантаження

## 2.4 Висновки по другому розділу

Результат чисельного експерименту показав, що використання трифазного некерованого випрямного моста призводить до значних пульсацій електромагнітного моменту генератора через несинусоїдальний характер струму фазних обмоток генератора. Для того, щоб усунути зазначений недолік випрямляча, як навантаження генератора ВЕУ запропоновано використання активного випрямляча напруги, який дозволяє вважати, що фазні обмотки генератора навантажені активними опорами. Тоді струм в обмотці генератора синусоїдальний і відповідно сінфазен напрузі в відповідній обмотці, а електромагнітний момент.

## 3 РОЗРОБКА КЕРУЮЧОЇ МОДЕЛІ

### 3.1 Розробка керуючої моделі контролера

Для забезпечення якісної зарядки акумуляторної батареї в складі вітроенергетичної установки і забезпечення функціонування вітроенергетичної установки згідно із заданими алгоритмами потребується контролер вітроенергетичної установки.

Основні функції, що накладаються на контролер:

- регулювання струму генератора в умовах, які постійно змінюються, швидкості вітру для забезпечення необхідної частоти обертання;
- обмеження струму заряду акумуляторної батареї;
- забезпечення умов безпечної роботи обладнання вітроенергетичної установки в робочих і аварійних режимах.

На даний момент існує ряд різних способів і режимів зарядки акумуляторних батарей. Всі зарядні пристрої (ЗП) повинні забезпечувати найбільш оптимальний режим заряду від початку до кінця процесу зарядки. Таким чином, ЗП забезпечують і автоматично змінюють величини напруги і струму в залежності від стадії самого процесу зарядки. При зарядці акумуляторної батареї постійним струмом протягом усього часу заряду величина зарядного струму залишається постійною. Перевагою такого способу зарядки є відносно мала тривалість заряду, проте в даному випадку відбувається прискорене «старіння» АКБ через високі струмові навантаження на останній стадії зарядки і, отже, знижується термін служби АКБ. Якщо ж процес зарядки виробляти при постійному напруги-ванні, то на останній стадії процес істотно сповільнюється і зростає час зарядки АКБ. Третій спосіб – комбінований або ж сумісний режим, що поєднує два раніше

описаних способу. У початковій стадії процесу йде заряд постійним струмом, а на завершальному етапі відбувається стабілізація напруги.

Можна стверджувати, що більшість усіх сучасних ЗП працює за комбінованим методом, що дозволяє оптимізувати такі параметри зарядки АКБ, як тривалість процесу і температура акумуляторної батареї. Додатковою перевагою такого підходу є можливість оптимізації параметрів зарядки для збільшення ресурсу акумуляторної батареї. Вплив параметрів заряду акумуляторної батареї на її ресурс можна пояснити тим, що струм заряду акумуляторної батареї призводить до її нагрівання, а температура електроліту впливає на швидкість протікання хімічної реакції в АКБ. З одного боку, це прискорює процеси запасання і віддачі електричної енергії, що дозволяє збільшити електричні струми розряду / заряду і скоротить час заряду АКБ, з іншого боку це призводить до прискорення процесів деградації властивостей акумуляторної батареї.

Дане протиріччя може бути дозволено рішенням завдання оптимального алгоритму зарядки.

Simulink дозволяє користувачеві створювати власні блоки і об'єднувати їх в бібліотеки для подальшого використання. Для цього існують два способи: графічний і програмний. Графічний спосіб є створення моделі зі стандартних блоків Simulink для реалізації функцій системи управління. Цей спосіб не є універсальним в силу того, що для перенесення результатів розробки на цільову систему управління потрібні трудомісткі операції по адаптації властивостей розроблюваного керуючого пристрою до результатам отриманої комп'ютерної моделі. Програмний спосіб є більш універсальним в силу того, що дозволяє створити комп'ютерну модель керуючого пристрою, в основі якої будуть покладені властивості і алгоритми роботи керуючого пристрою. При цьому робота цього пристрою буде здійснюватися під управлінням програмного забезпечення, написаного на мові високого рівня, і придатного для управління комп'ютерною моделлю і цільовим пристроєм.

При цьому завдання полягає в тому, щоб створити користувацький блок, що моделює роботу керуючої системи відповідно до заданим алгоритмом, який міг би використовувати програмний код це-лівої системи з мікропроцесорним управлінням.

Для реалізації можливості створення користувацьких блоків з різними властивостями, що задаються за допомогою програми, в Simulink існує блок S-Function. Це блок повинен бути пов'язаний з програм-мій, написаної на мові високого рівня і описує роботу цього блоку. У цій програмі зазвичай задаються такі параметри, як число входів і виходів цього пристрою, параметри ініціалізації блоку, а також взаємозв'язок між входами і виходами. При цьому опис робо-ти цього блоку може бути виконано на мові C, що дозволяє потім з легкістю перенести цю програму на цільове пристрій.

Для перевірки працездатності математичної моделі вона була реалізована за допомогою блоку S-Function в пакеті для математичних розрахунків MATLAB / Simulink, загальний вигляд моделі представлений на рисунку 3.1.

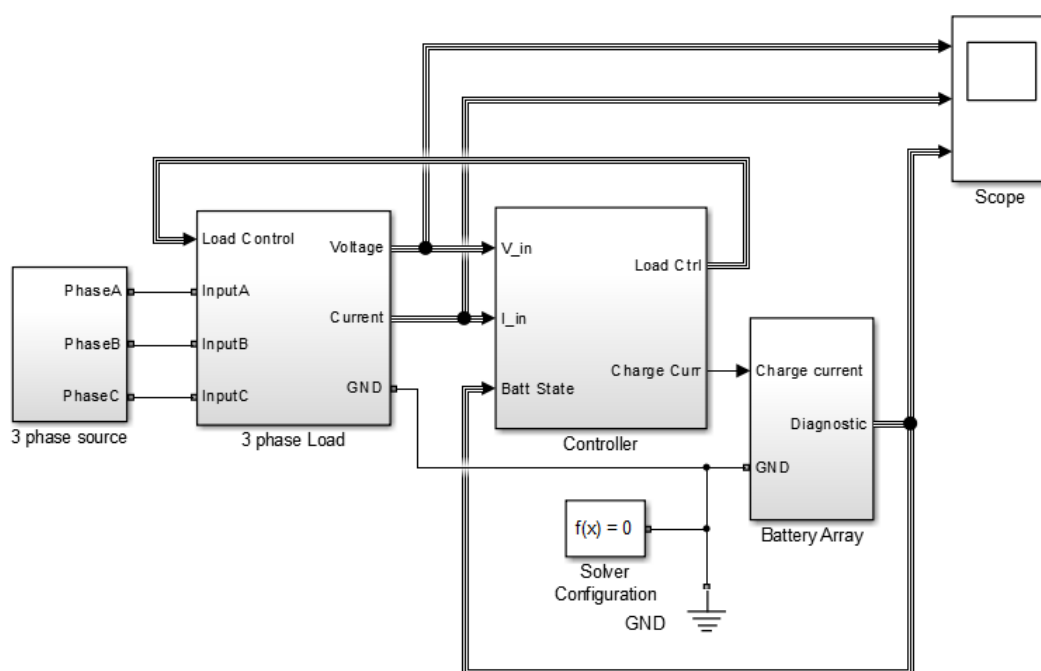


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд моделі в пакеті MATLAB / Simulink

Модель містить наступні основні блоки:

3 phase source – трифазний джерело електричної енергії для зарядного пристрою;

3 phase load – блок, що імітує навантаження електричної мережі і містить датчики струмів і напруг для кожної фази, а так само керовані резистори для імітації навантаження;

Controller – блок, що виконує функції керуючого контролера зарядного пристрою, містить в собі блок S-Function, здійснює зв'язок з керуючою програмою на мові високого рівня;

Battery array – масив осередків акумуляторної батареї, імітує поведінку реальної акумуляторної батареї і формує сигнали, що несуть інформацію про стан батареї для контролера зоря-так;

Scope – програмний осцилограф, що дозволяє контролювати різні сигнали в процесі проведення чисельного експерименту;

Solver Configuration – блок налаштувань параметрів чисельного експерименту, необхідний для коректної роботи моделей.

Таким чином, основу керуючого пристрою становить блок «Controller», який приймає данні вимірювань системи від датчиків і формує керуючі сигнали.

Структурна схема цього блоку наведена на 3.2.

З структурної схеми видно, що керуючий пристрій побудовано на блоці S-Function, який реалізований за допомогою програми, написаної на мові високого рівня.

Програмне середовище MATLAB / Simulink має власний редактор файлів, що дозволяє виробляти роботу над вихідним текстом програмного забезпечення без використання сторонніх програм.

Вікно редактора представлено на 3.3.

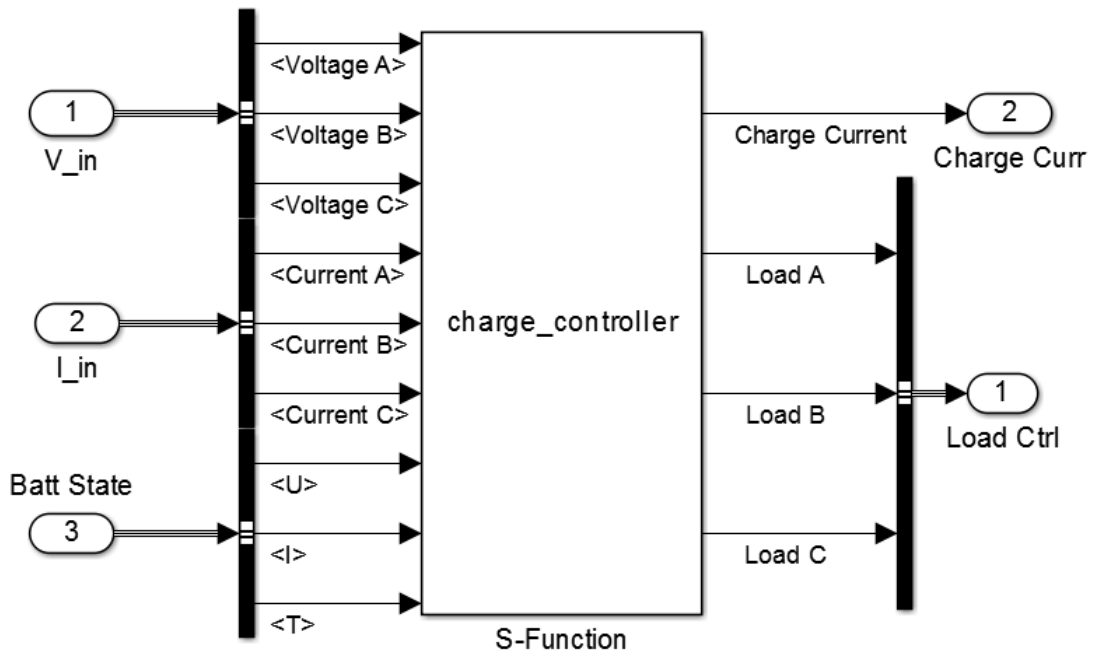


Рисунок 3.2 – Структурна схема керуючого пристрою

```

Editor - D:\Projects\Matlab\controller\charge_controller.c*
EDITOR VIEW
charge_controller.c* x +
7 #define NINPUTS 9
8 #define NOUTPUTS 4
9
10 /* Function: mdlInitializeSizes =====
11 static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
12 {
13     int_T i;
14
15     ssSetNumSFcnParams(S, 0);
16     if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
17         return; /* Parameter mismatch will be reported by Simu
18     }
19
20     if (!ssSetNumInputPorts(S, NINPUTS)) return;
21     for (i = 0; i < NINPUTS; i++) {
22         ssSetInputPortWidth(S, i, 1);
23         ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, i, 1);
24         ssSetInputPortOffsetTime(S, i, 0.0);
25         ssSetInputPortOverWritable(S, i, 0);
26     }
27 }
C / CPP source or header file Ln 13 Col 14

```

Рисунок 3.3 – Загальний вигляд моделі в пакеті MATLAB / Simulink

Текст програми є С-код, в якому можуть бути як оператори і функції мови С, так і callback-функції з макрокоманд, що дозволяють цього блоку взаємодіяти з типами даних Simulink, виконуючи команди і функції цього пакета.

Дані callback-функції викликаються не самим С-файлом, а середовищем Simulink.

Ці макроси дозволяють організувати взаємодію програми з комп'ютерною моделлю в про-процесі проведення чисельного експерименту. Крім callback-функцій і макрокоманд, С-файл може містити інструкції, що викликають інтерфейсні функції, які є в пакеті Matlab. Для цих операцій призначені функції з префіксом mex.

Callback-функції і макроси являють собою необхідний мінімум для написання файлу на мові С для створення власного SFunction блоку для Simulink.

С допомогою такого файлу користувач пакета Simulink може створити будь-який необхідний йому блок, який буде працювати по заданому алгоритму. Даний спосіб створення S-Function блоку є найбільш універсальним, оскільки не обмежений вибором бібліотечних елементів і не потребує вивчення користуванням різних нових інструмент, таких як S-Function Builder.

Таким чином, використання блоку S-Function дозволяє створити будь-який необхідний блок, логіка і алгоритм роботи якого можуть бути описані на мові високого рівня. При цьому частина коду, показує роботу цього блоку, може бути легко перенесена на цільову систему, що полегшує розробку програмного забезпечення системи управління, що працює під управлінням мікропроцесора.

Також варто відзначити, що даний спосіб використання блоку S-Function блоку є універсальним, що дозволяє створювати будь-які блоки для комп'ютерної моделі, не обмежуючи дослідника кінцевим набором

бібліотеки Simulink. Все це призводить до підвищення ефективності процесу розробки і проектування систем управління складними об'єктами за рахунок застосування математичного моделювання, чисельних методів і комплексів програм.

### 3.2 Математична модель накопичувача електричної енергії

Математична модель дозволяє проводити дослідження процесів перетворення і передачі енергії в акумуляторної батареї з системи управління прискореної зарядкою, визначати технічні вимоги до таких елементів моделі, і визначати характеристики енергозбереження та енергоефективності модельованих процесів.

Для проведення якісного моделювання електричної системи необхідні такі елементи системи, як джерела, перетворень і споживачі електричної енергії. При цьому для кожного режиму роботи склад цих елементів буде різний. Тому проведемо аналіз режимів і сформулюємо вимоги до моделей елементів системи.

Виходячи з вимог до комп'ютерної моделі ВЕУ, можна виділити два основні режими експлуатації системи: режим заряду АКБ і режим розряду АКБ.

Режим заряду АКБ повинен забезпечувати зарядку акумуляторної батареї від джерела змінного струму. Таким чином, для здійснення цієї функції потрібні:

- модель джерела електричної енергії у вигляді генератора перемінного струму;
- модель перетворювача змінного струму в постійний, при повній потужності заряду АКБ (випрямляч);
- модель перетворювача постійного струму в струм заряду АКБ, який повинен здійснювати регулювання струму заряду акумуляторної батареї;

– модель акумуляторної батареї, яка виконує функції споживача електричної енергії.

Режим розряду АКБ повинен забезпечувати живлення навантаження від акумуляторної батареї. Таким чином, для здійснення цієї функції потрібні:

– модель акумуляторної батареї, яка виконує функції джерела електричної енергії;

– модель інвертора змінного струму, розрахованого на повну потужність навантаження з урахуванням можливої перевантаження в момент включення, який повинен здійснювати формування вихідного напруги синусоїдальної форми;

– модель споживача електричної енергії у вигляді електродвигуна-теля змінного струму.

Розробляється модель електрохімічних елементів повинна враховувати такі особливості експлуатації акумуляторних батарей:

– вплив струму підзарядку на характеристики електрохімічного елемента;

– вплив температури на характеристики електрохімічного елемента;

– облік режиму розряду акумулятора.

Математична модель процесів в акумуляторі розроблена в MatLab. Модель ємності дає стан заряду (SOC) і глибини заряду батареї, модель напруги дає опір як функція стану заряду і глибини заряду, теплова модель дає внутрішню температуру.

Вхідними сигналами математичної моделі є струм і температура навколишнього середовища, а вихідними – напруга, температура електроліту і т.д., як показано на рисунку 3.4.

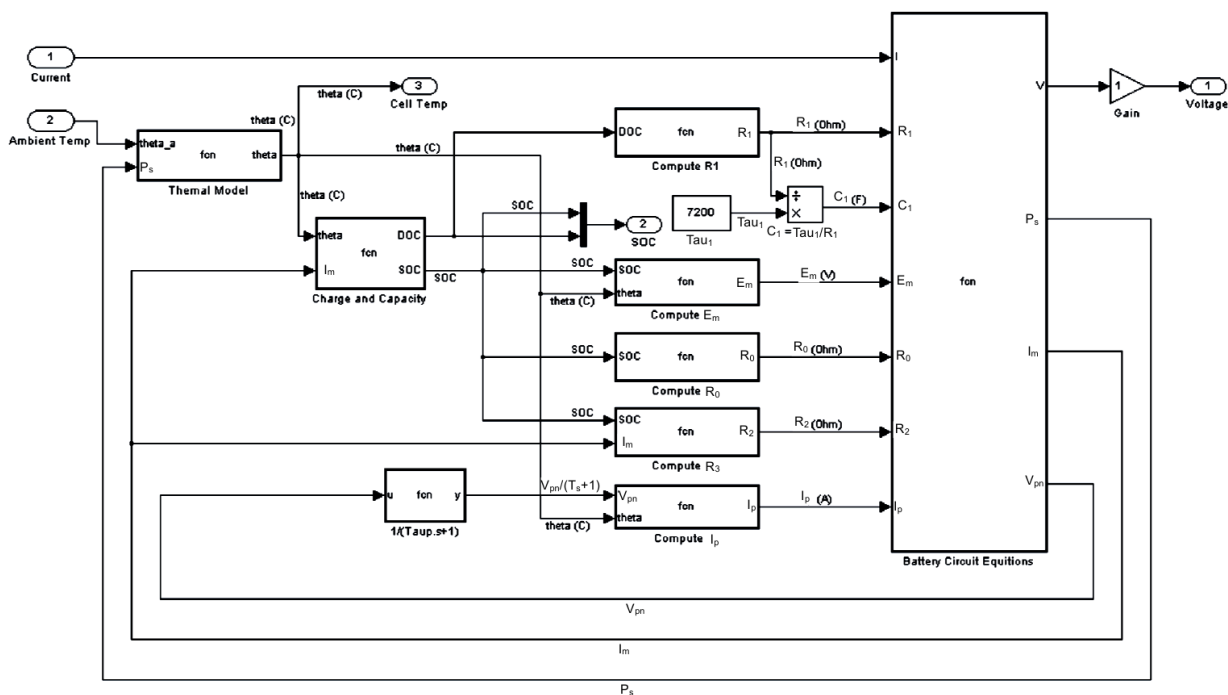


Рисунок 3.4 – Блок-схема комп'ютерної моделі осередку АКБ

Рівняння батареї для математичної моделі будуть використовуватися для імітації параметрів, включаючи основну гілку, паразитарну гілку, ємність і температуру електроліту.

### 3.3 Синтез комп'ютерної моделі ВЕУ для імітаційного моделювання

Згідно функціональної схеми імітаційної моделі вітроенергетичної установки, в пакеті MATLAB / Simulink з розроблених модулів була синтезована загальна модель ВЕУ, загальний вигляд якої представлений на рисунку 3.5.

Модель призначена для проведення модельних експериментів з дослідження різних алгоритмів управління ВЕУ, можливість чого забезпечується завданням різних алгоритмів на мові високого рівня в модулі контролера ВЕУ.

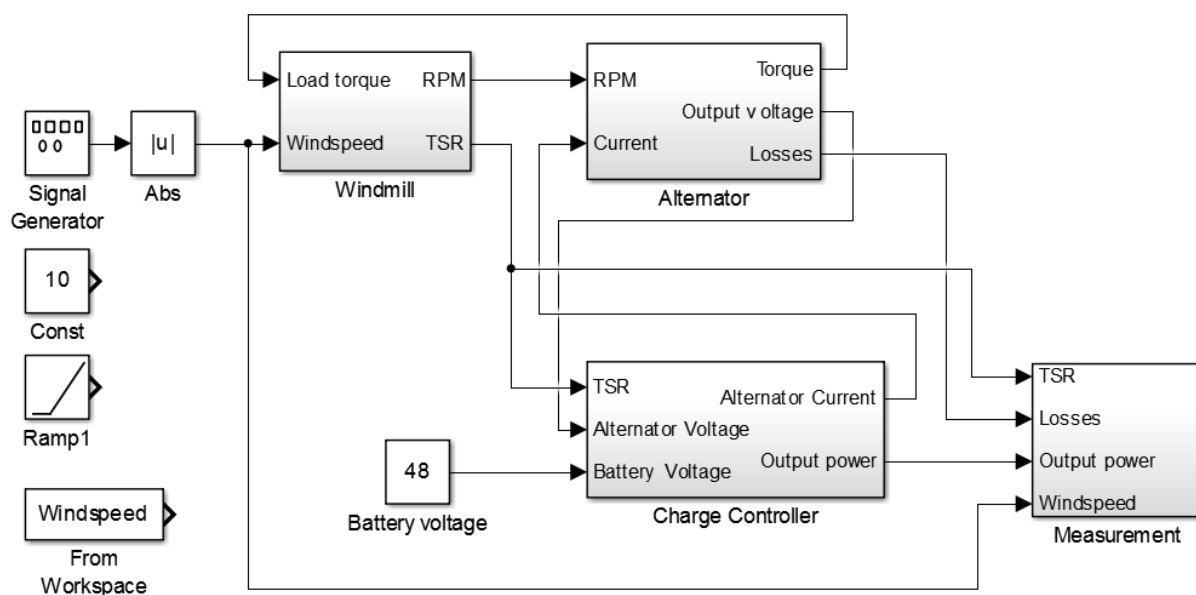


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд моделі в пакеті MATLAB / Simulink

### 3.4 Висновки по третьому розділу роботи

В результаті роботи з розробки комп'ютерних моделей для імітаційного моделювання в середовищі MATLAB / Simulink була створена універсальна модель вітроенергетичної установки, яка складається з таких модулів:

- модуль генерації вітрової дії, що виконує функцію джерела енергії для роботи вітроенергетичної установки;

- модуль вітродвигуна вітроенергетичної установки, який перетворює енергію вітру в механічну енергію обертання валу вітроколеса;

- модуль електричного генератора, який перетворює механічну енергію обертання валу в електричну енергію;

- модуль універсального контролера вітроенергетичної установки, що забезпечує роботу ВЕУ за заданим алгоритмом, і призначення для дослідження різних алгоритмів і способів управління потужністю вітроенергетичної установки;

- модуль акумуляторної батареї, що виконує функцію буферного накопичувача електричної енергії.

## 4 ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБУ УПРАВЛІННЯ ПОТУЖНІСТЮ ВЕУ

### 4.1 Дослідження різних способів регулювання

Для визначення найбільш ефективного способу управління потужністю ВЕУ було вирішено проаналізувати наступні способи управління потужністю:

- ВЕУ, що працює при постійній частоті обертання вітроколеса;
- ВЕУ, що працює при декількох фіксованих частотах обертання вітроколеса шляхом перемикавання обмоток генератора;
- ВЕУ, що працює при декількох фіксованих частотах обертання вітроколеса шляхом перемикавання передавального відносини мультиплікатора;
- ВЕУ, що працює при змінній частоті обертання і виконуюча електричний перетворювач з регулятором потужності.

Спосіб управління вітроенергетичної установкою при змінній частоті обертання зі зміною установчого кута лопатей вітроколеса або зміною геометричних розмірів вітроколеса було вирішено виключити з розгляду через очевидну складність практичної реалізації конструкції.

Блок-схема універсальної моделі для аналізу різних вітроенергетичних установок, що включає в себе чотири різні ВЕУ, наведена на рисунку 4.1.

Кожна модель ВЕУ в процесі моделювання була піддана наступним діям швидкості вітру:

- зростаюча та навпаки швидкість вітру, параметри джерела впливу наведені на рисунку 4.2;
- гармонійно змінюється швидкість вітру, параметри джерела впливу наведені на рисунку 4.3.

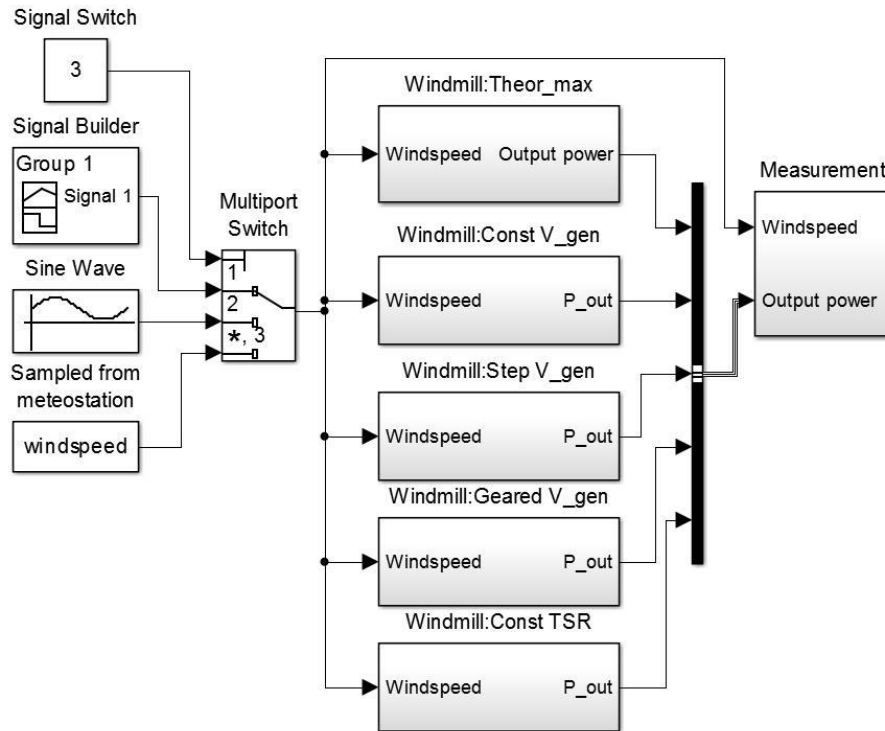


Рисунок 4.1 – Блок-схема універсальної моделі для аналізу різних вітроенергетичних установок

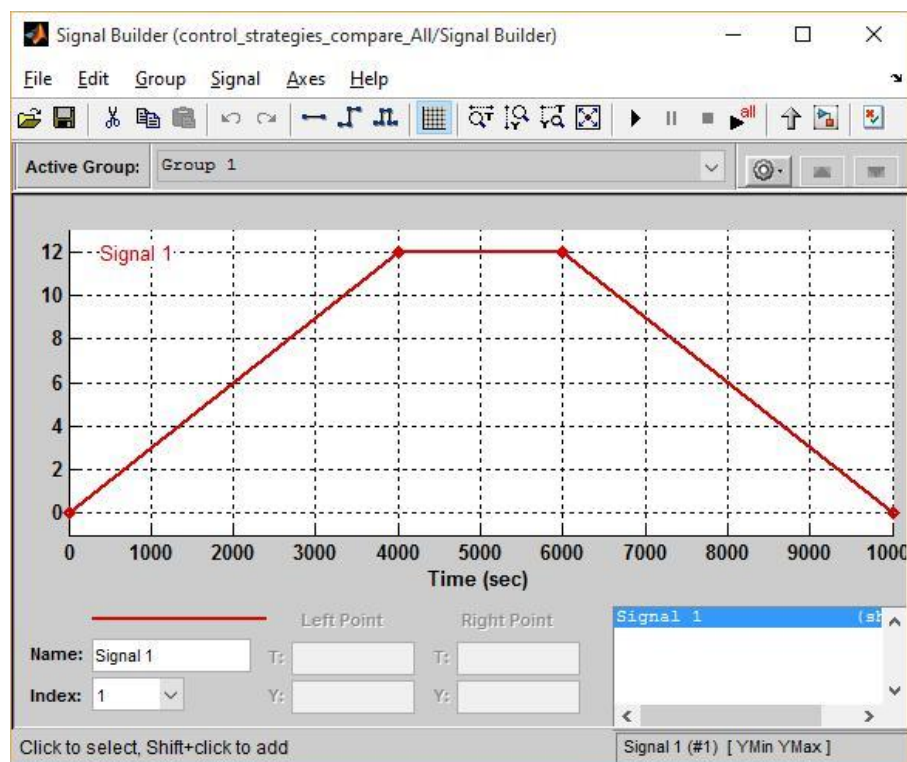


Рисунок 4.2 – Параметри блоку моделі зростаючої та навпаки швидкості вітру

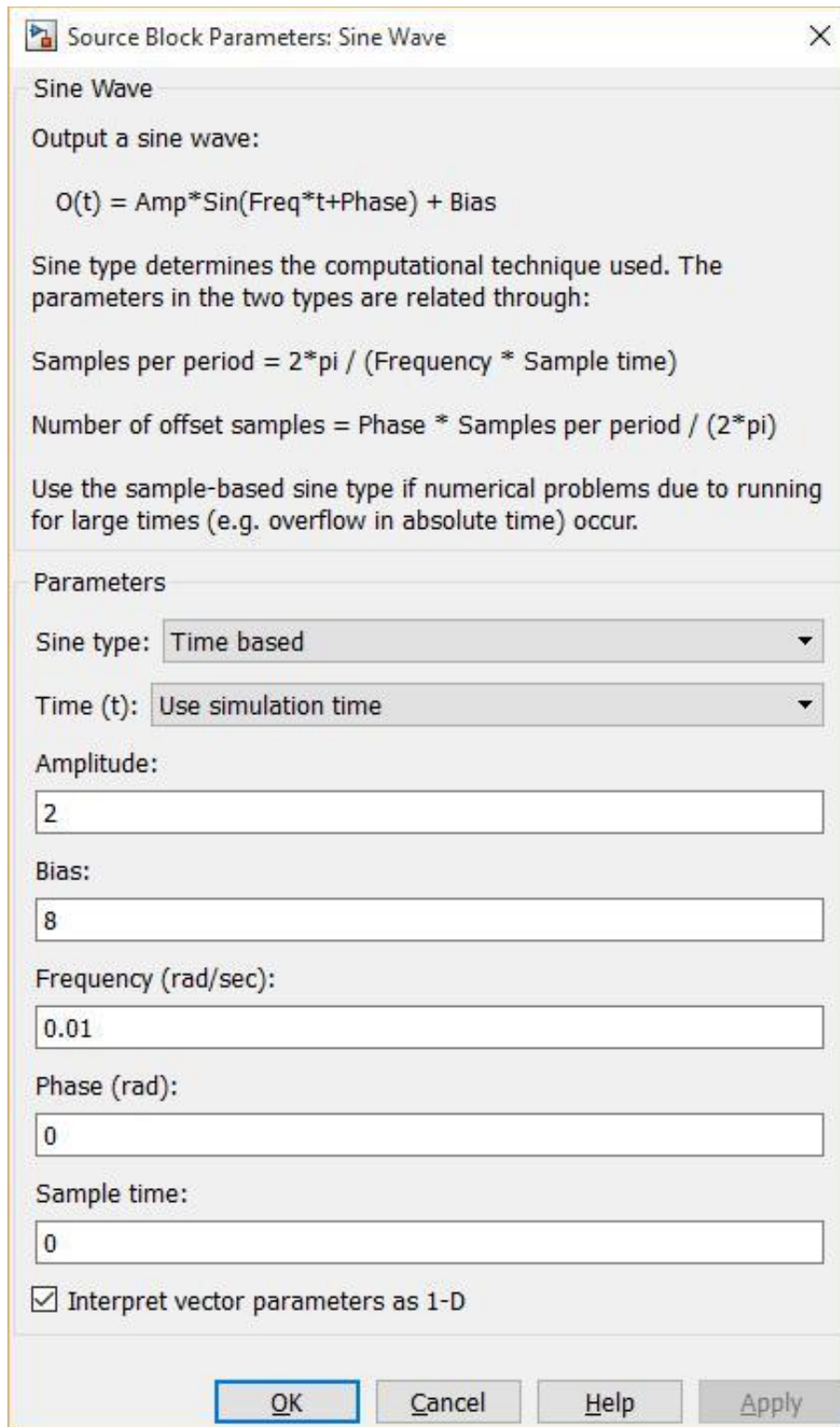


Рисунок 4.3 – Параметри блоку моделі гармонійно змінюючої швидкості вітру

Реальна швидкість вітру, задана за допомогою файлу даних, що містить вибірки швидкостей вітру, отримані за допомогою анемометру при проведенні спостережень.

Для вимірювання ефективності роботи вітроенергетичних установок в заданих умовах був розроблений блок «Measurement», заснований на спостерігачі зниженого порядку за виразами (Refestimator). Модуль містить п'ять однакових модулів вимірювання характеристик вітроенергетичних установок. Також є модуль розрахунку генерується ідеальної вітроенергетичної установки з тими ж аеродинамічними параметрами вітроколеса, як і досліджуваних моделей.

#### 4.2 Робота при постійній частоті обертання

Спосіб управління потужністю вітроенергетичної установки при постійній частоті обертання вітроколеса представляється найбільш цікавий з точки зору простоти реалізації конструкції ВЕУ. Так само можна відзначити, що така конструкція повинна забезпечити найбільшу надійність при мінімальній вартості виробу.

Для дослідження особливостей роботи такої вітроенергетичної установки була використана універсальна комп'ютерна модель ВЕУ, представлена на рисунку 4.4. Модель складається з наступних модулів:

- «Windmill» – модуль, що імітує роботу вітродвигуна;
- «Alternator» – модуль, що імітує роботу електричного генератора ВЕУ;
- «Charge Controller» – модуль, що імітує роботу контролера заряду акумуляторної батареї і системи управління, що забезпечує необхідні режими роботи ВЕУ, блок-схема модуля наведена на рисунку 4.5.

Модель вітродвигуна, блок-схема якої представлена на рисунку 4.6, містить модуль розрахунку крутного моменту в залежності від швидкості вітру «Windturbine».

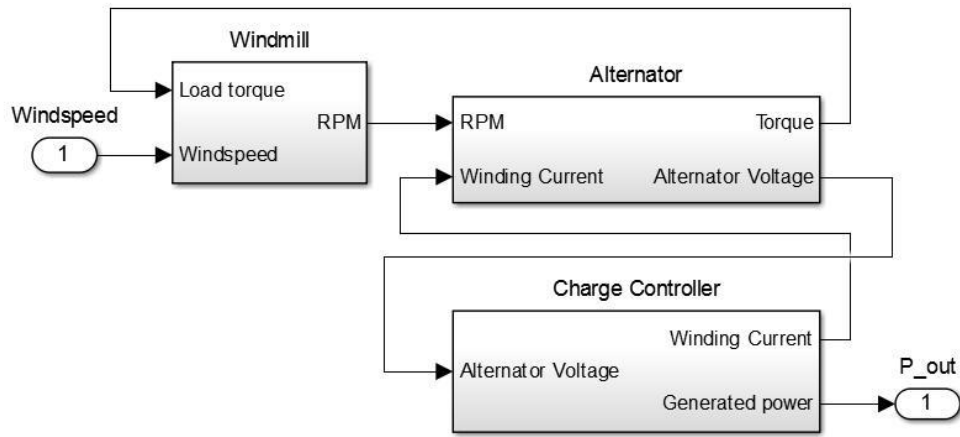


Рисунок 4.4 – Модель вітроенергетичної установки, що працює при постійній частоті обертання валу вітродвигуна

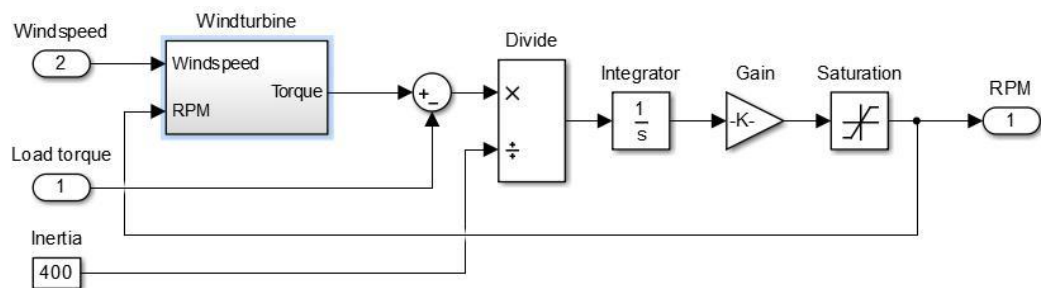


Рисунок 4.5 – Блок-схема моделі вітродвигуна ВЕУ

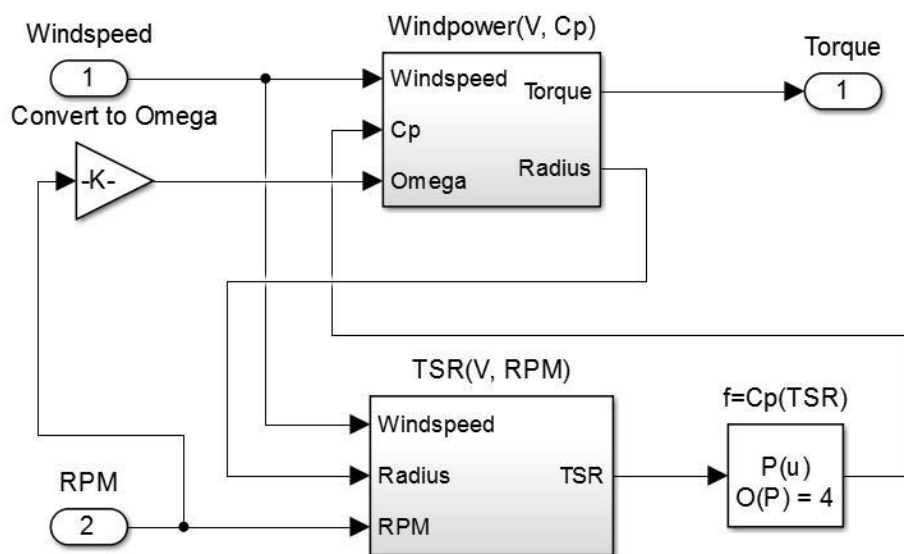


Рисунок 4.6 – Блок-схема моделі вітроколеса, що створює крутний момент в вітродвигунів ВЕУ

Для коректного розрахунку крутного моменту потрібно поточне значення швидкості, яке розраховується в модулі «TSR (V, RPM)», представленому на рисунку 4.7. Крутий момент при цьому розраховується в модулі «Windpower (V, Cp)», представленому на рисунку 4.8.

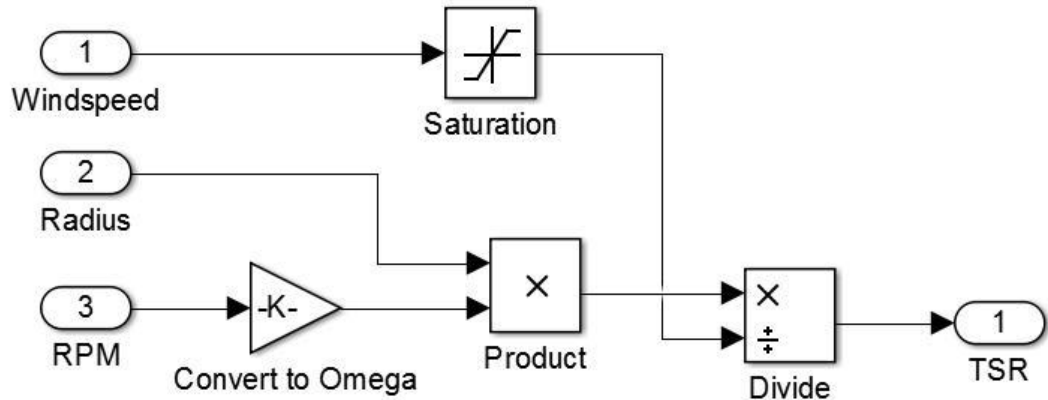


Рисунок 4.7 – Блок-схема модуля обчислення поточної швидкості вітроколеса ВЕУ

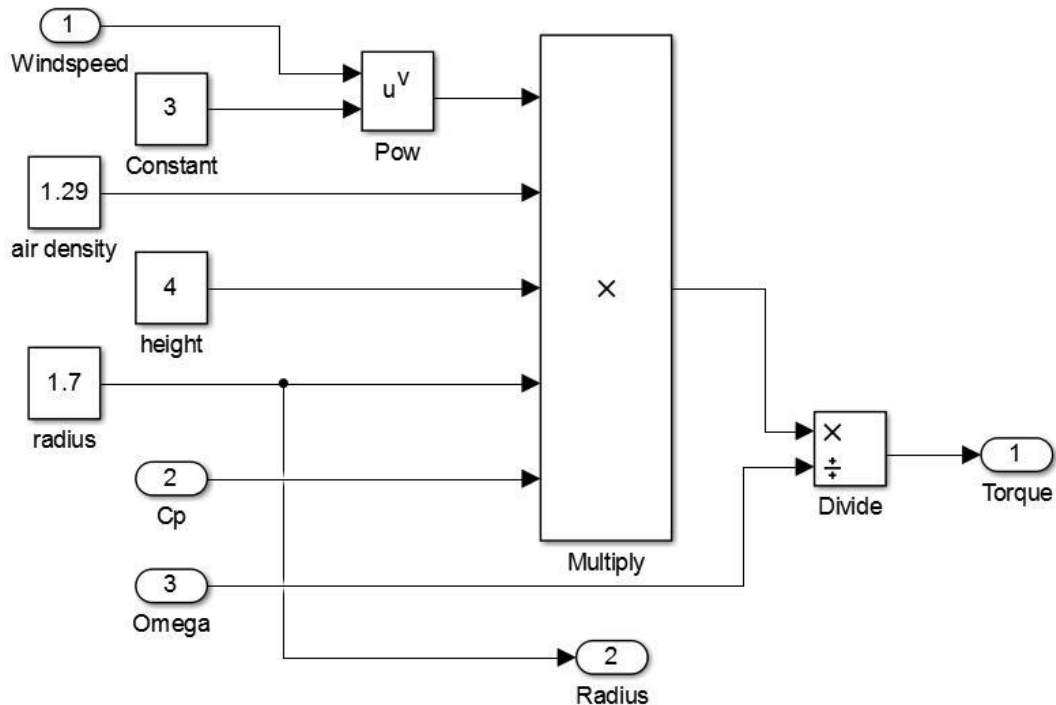


Рисунок 4.8 – Блок-схема модуля обчислення поточного крутного моменту вітродвигуна ВЕУ

Модуль електричного генератора, блок-схема якого представлена на рисунку 4.9, обчислює поточне значення ЕРС в обмотках генератора, величину падіння напруги на внутрішньому опорі. Гальмівний момент, що виникає в генераторі при роботі на задану навантаження. Вихідним параметром модуля є напруга на клеммах і гальмівний момент на валу генератора.

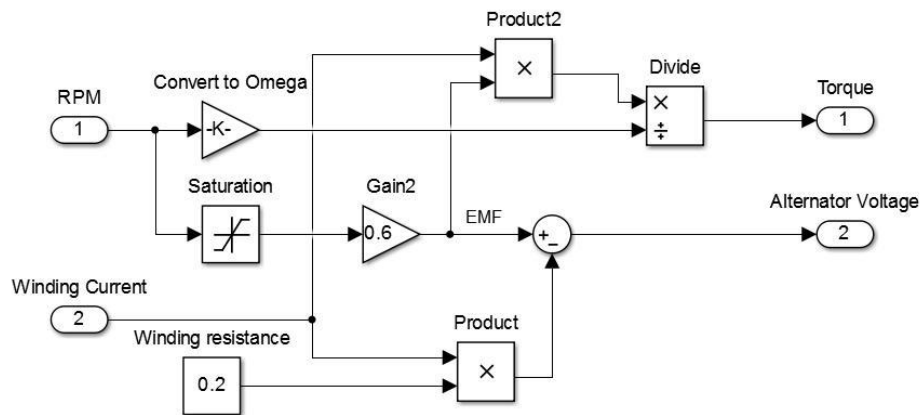


Рисунок 4.9 – Блок-схема моделі генератора ВЕУ

Модуль контролера заряду вітроенергетичної установки імітує роботу діодного випрямляча електричного генератора змінного струму, при підключенні якого до акумуляторної батареї відходить регулювання зарядного струму АКБ шляхом зміни вхідного на-напруги випрямляча. Блок-схема модуля наведена на рисунку 4.10.

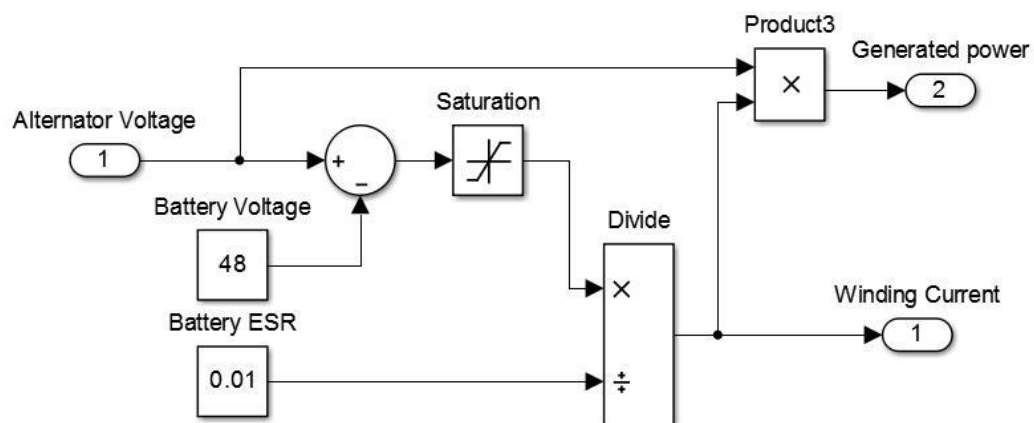


Рисунок 4.10 – Блок-схема моделі контролера заряду ВЕУ

В процесі дослідження модель була випробувана впливом різної швидкості вітру на рисунку 4.11.

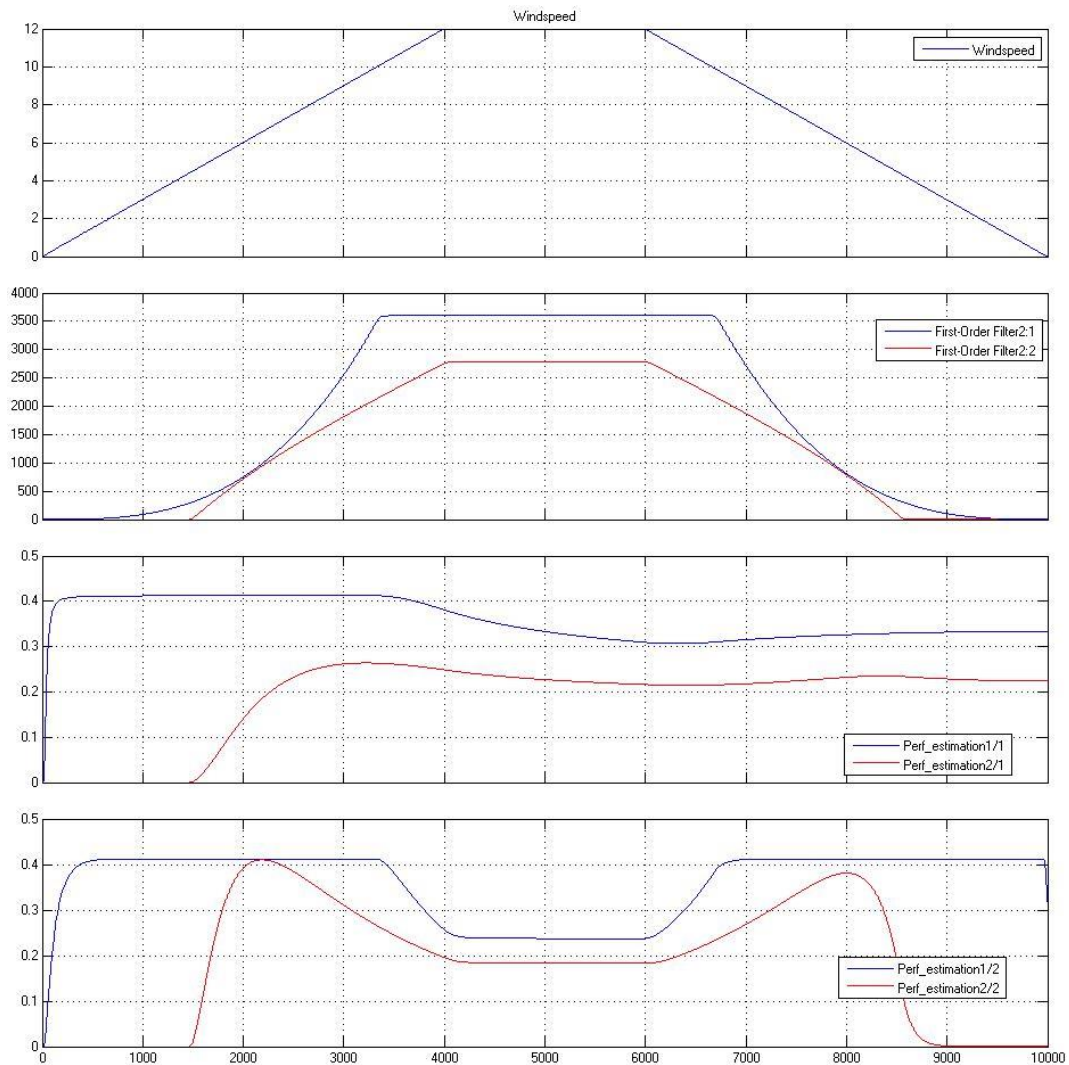


Рисунок 4.11 – Результат моделювання роботи ВЕУ при впливі різної швидкості вітру

Верхній графік на рисунку показує залежність швидкості вітру в часі.

Другий зверху графік відображає графік максимальної-можливої і генерується в залежності від часу моделювання, де синім кольором зображено максимально-можлива електричних потужність ВЕУ, а червоним – поточний розрахункове значення.

Третій зверху графік відображає інтегральне значення коефіцієнта використання енергії вітру, де синім кольором зображено максимально-можливе значення KEIB, а червоним – поточний розрахункове значення.

Нижній графік відображає усереднене за допомогою фільтра нижніх частот значення коефіцієнта використання енергії вітру, де синім кольором зображено максимально-можливе значення KEIB, а червоним – поточний розрахункове значення.

З графіків видно, що до певної швидкості вітру енергія в вітроенергетичної установки не генерується взагалі. Потім, при збільшенні швидкості вітру, що генерується потужність зростає слідом за швидкістю вітру, досягаючи свого максимуму при максимальній швидкості вітру.

Максимальна ефективність роботи ВЕУ спостерігається в досить вузькому діапазоні швидкостей вітру на швидкостях близько 8 м / с, при інших швидкостях вітру є потенціал для підвищення продуктивності.

На рисунку 4.12 наведені результати випробування моделі впливів гармонійно змінюється швидкості вітру.

З графіків видно, що модель адекватно реагує на зміну швидкості вітру, при цьому видно що інтегральне значення KEIB становить 0,32, що менше максимально-можливого 0,42.

При цьому з графіка усередненого значення KBEВ видно, що максимальна ефективність досягається при швидкості вітру 8 м/с, знижуючись до величини 0,27 при відхиленні від цієї величини.

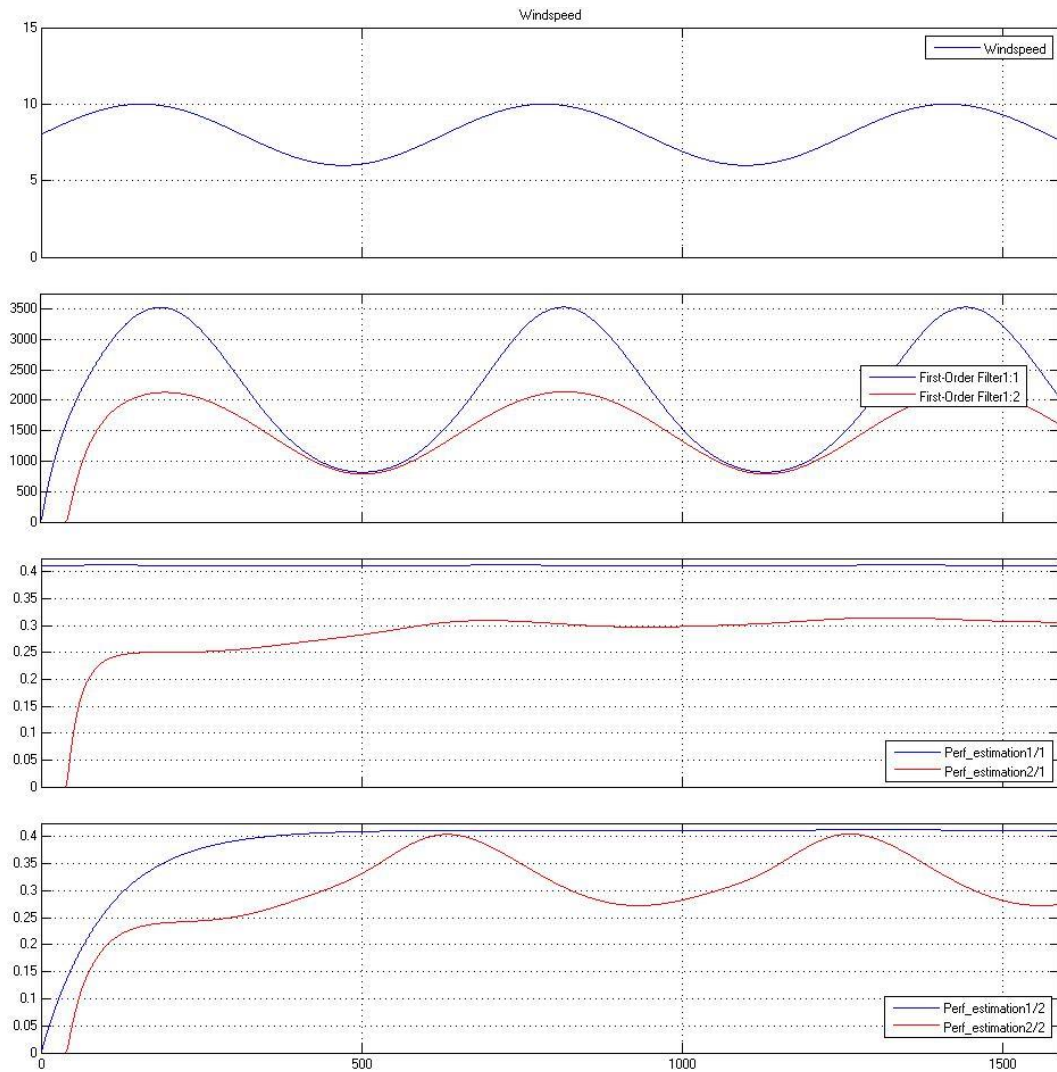


Рисунок 4.12 – Результат моделювання роботи ВЕУ при впливі гармонійно змінюється швидкості вітру

На рисунку 4.13 наведені результати випробування моделі взаємодією реальної швидкості вітру. Швидкість вітру при цьому безперервно змінюється навколо середнього значення 7м/с. З графіків видно, що модель адекватно реагує на зміну швидкості вітру, при цьому видно що інтегральне значення КЕІВ становить 0,35, що менше максимально-можливого 0,42. З графіка усередненого значення КІЕВ видно, що ефективність ВЕУ безперервно змінюється слідом за зміною швидкості вітру, дуже рідко досягаючи максимально-можливого значення.

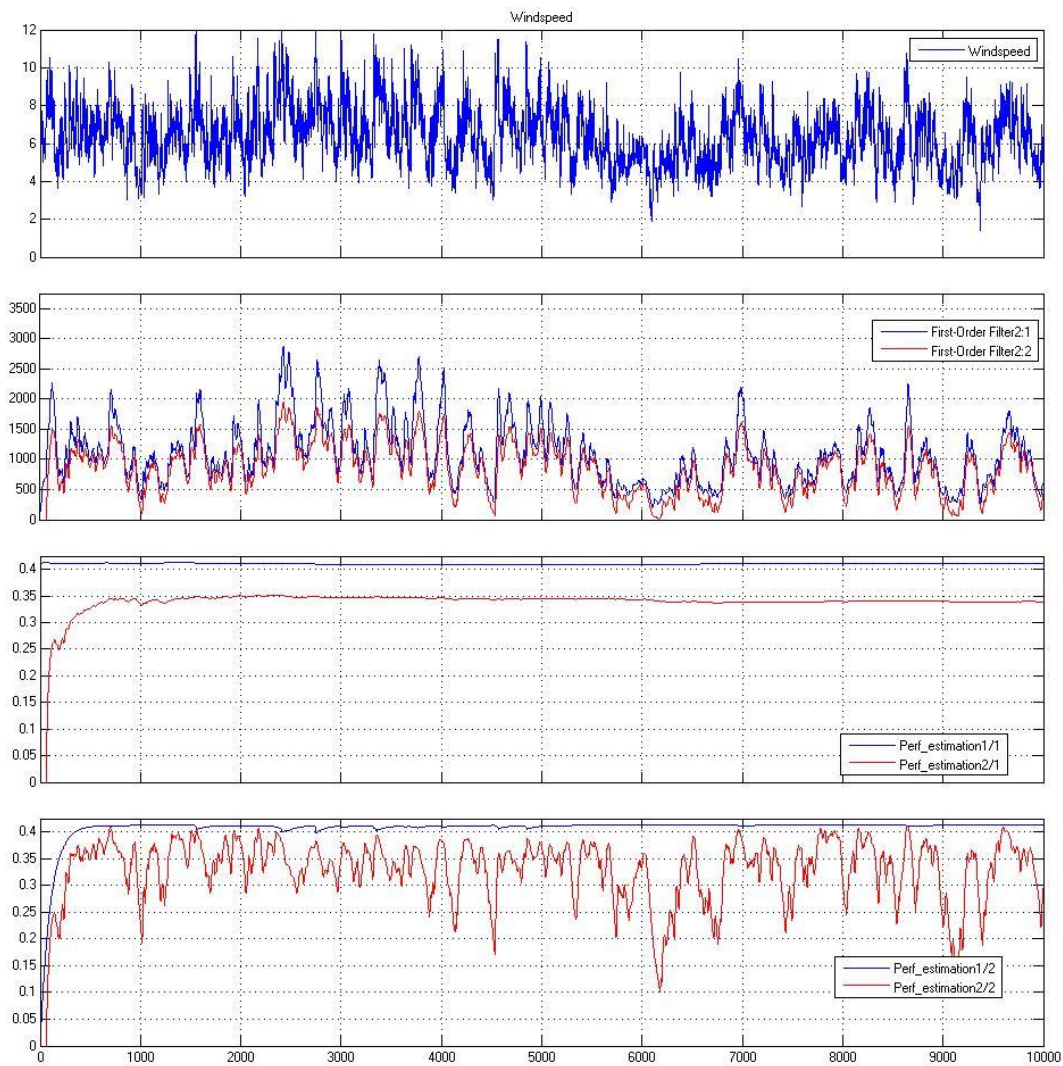


Рисунок 4.13 – Результат моделювання роботи ВЕУ при впливі реальної швидкості вітру

### 4.3 Охорона праці

Розміри лабораторії, в якій виконувалася робота, складають 5 м×6 м. Робоче місце складається зі стола, стільця і персонального комп'ютера. У приміщенні працює 4 людини. Площа приміщення 30 м<sup>2</sup>, об'єм – 90 м<sup>3</sup>. Згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 площа на одне робоче місце має становити не менше 6 м<sup>2</sup>, а об'єм – 20 м<sup>3</sup>. Для даного приміщення робоча площа і об'єм на одну людину відповідає нормам, так як в нашому випадку площа на одне робоче місце становить 10 м<sup>2</sup>, а об'єм – 30 м<sup>3</sup>.

Живлення комп'ютерів здійснюється від трифазної чотирипровідної електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц.

Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 лабораторію можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки, так як в приміщенні відсутні чинники, які викликають підвищену або особливу небезпеку.

Для створення безпечних умов праці необхідно провести ряд організаційних і технічних заходів. Згідно НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом в приміщенні застосовується система занулення.

Згідно вимог НПАОП 0.00-4.12-05 необхідно провести увідний, первинний на робочому місці, повторний, цільовий та позаплановий інструктажі. Зміст інструктажу відповідає вимогам НПАОП 0.00-4.12-05. Інструктаж відзначається в відповідних журналах з підписами інструктованих і інструктора.

Робота в лабораторії проводиться сидячи і не вимагає фізичного напруження. Тому вона відноситься до категорії Іа (легкі фізичні роботи, енергозатрати до 120 ккал/ч). З метою забезпечити комфортні умови для працівників та згідно з ДСН 3.3.6.042-99 в приміщенні встановлені наступні метеорологічні параметри:

а) для холодного періоду:

- 1) температура повітря від 22 °С до 24 °С;
- 2) вологість повітря від 40 % до 60 %;
- 3) швидкість руху повітря оптимальна до 0,1 м/с;

б) для теплого періоду року:

- 1) температура повітря від 23 °С до 25 °С;
- 2) вологість повітря від 40 % до 60 %;
- 3) швидкість руху повітря оптимальна до 0,1 м/с.

Для освітлення робочих місць і приміщення в цілому застосовується як природне бічне освітлення, так і штучне освітлення.

Приміщення з ЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5 %:

$e^{IV} = 1.35$ , де  $e^{IV}_{\text{норм}}$  – нормоване значення КПО для 4-го поясу світлового клімату СНД.

Згідно ДСН 3.3.6.037-99 рівень шуму в лабораторії не перевищує 50 дБ.

Загальний рівень штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності.

Розрахункова формула методу [17]:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.1)$$

де  $W$  – питома потужність, Вт/м<sup>2</sup>;

$S$  – площа приміщення, м<sup>2</sup>;

$W_{\Sigma}$  – загальна потужність освітлювальної установки, Вт.

Загальна потужність освітлювальної установки розраховується за формулою

$$W_{\Sigma} = W_{ce} \cdot n_{ce}, \quad (4.2)$$

де  $W_{ce}$  – потужність одного світильника,  $W_{ce} = 80$  Вт;

$n_{ce}$  – кількість світильників в приміщенні,  $n_{ce} = 4$  шт.

Розглянуте приміщення має площу 30 м<sup>2</sup>, в якому розташовано шість світильників потужністю 80 Вт

$$W_{\Sigma} = 4 \cdot 80 = 320 \text{ Вт},$$

$$W = \frac{320}{30} = 11 \text{ Вт/м}^2.$$

Табличне значення для отриманого результат освітленість складе 200 лк, коли згідно стандарту ДБН В.2.5-28-2006. в лабораторії освітленість повинна бути 300-500 лк. Для отримання освітленості в 400 лк необхідна питома потужність 21 Вт/м<sup>2</sup>.

Для поліпшення умов роботи в лабораторії необхідно в денний час застосовувати додаткове освітлення.

#### 4.4 Висновки по четвертому розділу роботи

Дослідження показали, що в умовах постійних швидкостей вітру найбільш оптимальним є спосіб утримання постійної частоти обертання вертикально-осьової ВЕУ завдяки простоті і дешевизні рішення.

Однак в разі, коли потрібно забезпечити ефективну роботу ВЕУ при змінюються швидкостях вітру, найкращим рішенням представляється робота ВЕУ зі змінною частотою обертання ротора. Базуючись на залежності аеродинамічній потужності вітроколеса від швидкості вітру і частоти обертання сформулювати правило, що для будь-якої заданої швидкості вітру існує частота обертання ротора, при якій потужність вітроенергетичної установки буде максимальною.

## ВИСНОВКИ

У роботі розглянуті основні способи управління застосовні до різних конструкцій вітродвигуна вітроенергетичної установки, що дозволяє, сконцентрувавшись на вивченні способів управління, застосувати отриманий досвід на все різноманіття вітроенергетичних установок.

Результат чисельного експерименту показав, що використання трифазного некерованого випрямного моста призводить до значних пульсацій електромагнітного моменту генератора через несинусоїдальний характеру струму фазних обмоток генератора. Для того, щоб усунути зазначений недолік випрямляча, як навантаження генератора ВЕУ запропоновано використання активного випрямляча напруги, який дозволяє вважати, що фазні обмотки генератора навантажені активними опорами. Тоді струм в обмотці генератора синусоїдален і відповідно сінфазен напрузі в відповідній обмотці, а електромагнітний момент.

В результаті роботи з розробки комп'ютерних моделей для імітаційного моделювання в середовищі MATLAB / Simulink була створена універсальна модель вітроенергетичної установки, яка складається з таких модулів:

- модуль генерації вітрової дії, що виконує функцію джерела енергії для роботи вітроенергетичної установки;
- модуль вітродвигуна вітроенергетичної установки, який перетворює енергію вітру в механічну енергію обертання валу вітроколеса;
- модуль електричного генератора, який перетворює механічну енергію обертання валу в електричну енергію;
- модуль універсального контролера вітроенергетичної установки, що забезпечує роботу ВЕУ за заданим алгоритмом, і призначення для дослідження різних алгоритмів і способів управління потужністю вітроенергетичної установки;

– модуль акумуляторної батареї, що виконує функцію буферного накопичувача електричної енергії.

Дослідження показали, що в умовах постійних швидкостей вітру найбільш оптимальним є спосіб утримання постійної частоти обертання вертикально-осьової ВЕУ завдяки простоті і дешевизні рішення.

Настав час подальшого розвитку створення потужних вітроенергетичних установок, а на їх основі – вітроенергетичних систем потужністю в кілька десятків мільйонів кіловат. Сучасний рівень техніки, технології та машинобудування цілком можуть забезпечити створення вітроенергетичних систем, які зможуть забезпечити енергопостачання всіх галузей промисловості, транспорту і сільського господарства.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення: Введ. 2015-22-06. – К.: Вид-во стандартів, 2016. – 26 с.

2. Методичні вказівки з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, В.В. Косенко, В.В. Євсєєв. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 55 с.

3. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипченко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.

4. Конспект лекцій з дисципліни "Теорія автоматичного управління" для напряму підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Електронний ресурс] / ХНУРЕ ; розроб. О. В. Токарева. - Харків, 2015. – 32 с.

5. Основи наукових досліджень: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, Ю.М. Олександров, А.О. Андрусевич, О.О. Чала. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 396 с.

6. Яхно, О.М. Ветроэнергетика: конструирование и расчет ВЭУ / О.М. Яхно, Т.Г. Таурит, И. Г. Грабар – Житомир : ЖГТУ, 2003. – 162 с..

7. Белей, В.Ф. Ветроэнергетические установки: тенденции развития, проблемы подключения и эксплуатации в составе электроэнергетических систем / В. Ф. Белей // – М. : Малая энергетика. 2005. – № 1–2. – с. 6.

8. Anikin A. S., Martyanov A. S., Martyanov N. A. Comparative analysis of wind turbines control strategies // *Procedia Engineering: International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015)*. – 2015. – С. 607–614.

9. Martyanov A., Solomin E. Modelling of Wind Turbine Performance Measurement // *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. – 2014. – № 2. – С. 18–25.

10. Аникин А. С., Мартьянов А. С. Моделирование цифровых систем управления в среде MATLAB/SIMULINK // Сборник статей 89-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобилестроение России: новые вызовы», Москва. – 2015.

11. Безруких, П.П. Использование энергии ветра / П.П. Безруких.– М.: Колос, 2008. –С. 9–158.

12. Ганджа, С.А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для автономных и сетевых ветроэнергетических установок / С.А.Ганджа // *Альтернативная энергетика и экология*. – М.:НИИЭС. – 2010 – №1. – С.25–28.

13. Дьяконов, В. Математические пакеты расширения MATLAB. Система символьной математики / В. Дьяконов, В. Круглов.– М.: Нолидж, 1999. – 328 с.

14. Зубова, Н. В. Методы оптимального управления ветроэнергетической установкой по критерию энергетической эффективности / Н. В. Зубова, С. Н. Удалов, В. З. Манусов // *Материалы 5 Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования»*. – Томск: Изд-во ТПУ, 17–18 мая 2012 г., с.16–19.

15.Кирпичникова И. М., Мартьянов А. С., Соломин Е. В. Моделирование генератора ветроэнергетической установки // *Электротехника*. – М.: – 2013. – № 10. – С. 46–49.

16. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. / Ю. Лазарев. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.

17. Мартьянов А. С. Регулирование мощности в ветроэнергетической установке // Научный поиск: материалы третьей научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2011. – Т. 2. – С. 206–209.

18. Матвеев О.В. Комплексная программно-математическая модель ветроэнергетической установки / О.В. Матвеев // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010 – №5(85). – С.64–70.

19. Яковлев, А.И. Расчет ВЭУ с вертикальной осью вращения. Расчет ветротурбин с вертикальной осью вращения/ А. И. Яковлев, М. А. Затучная. – Учеб. пособие по курсовому проектированию. – Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. инс.», 2002 г. – 61 с.

20. Янсон, Р.А. Ветроустановки: учебное пособие / Р.А. Янсон. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2007. – 36 с.