

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Автономний перетворювач вітроенергетичної установки на базі
безконтактної електричної машини»

Виконав: студент 2-го курсу, гр. ЕПА-23м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Максим МАТЕВОСЯН
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. кафедри КЕМСК
Олена НАНАКА
(прізвище та ініціали)

« 19 » 14 2024 р.

Опонент: к.т.н. доц. кафедри ЕСЕМ

Григоренко О.В.
(прізвище та ініціали)

« 07 » листопада 2024 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри

« 19 » листопада 2024 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

Завідувача кафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

“17” серпня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Матевосяну Максиму Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Автономний перетворювач вітроенергетичної установки на базі безконтактної електричної машини

керівник роботи Нанак Олена Миколаївна, к.т.н., доц. каф. КЕМСК

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “17” вересня 2024 року № 310

2. Строк подання студентом роботи 30 листопада 2024р.

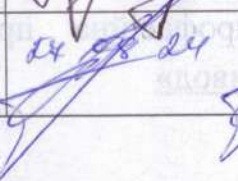
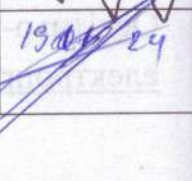
3. Вихідні дані до роботи: номінальна потужність вітроенергетичної установки – 15 кВт, швидкість вітру – 10.5 м/с, швидкість вітру при пориві – 25 м/с, ККД електричний – 0.9, ККД механічний – 0.97, тип системи електропостачання – ВЕУ з безконтактною машиною постійного струму (СМ)

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1 Система відновлюваних джерел енергії на основі вітроенергетичних установок. 2 Розробка структурної схеми ВЕУ та типи електричних машин в якості генератора. 3 Техніко-економічне обґрунтування впровадження електротехнічного комплексу вітроенергетичної установки. 4 Математичні моделі електротехнічного комплексу вітроенергетичної установки. 5 Розробка системи векторного керування вітроенергетичної установки на базі безконтактної машини постійного струму. 6 Алгоритм автоматизованої роботи ВЕУ. 7 Охорона праці. Висновки.

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

1. Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження. 2. ВДЕ на основі вітроенергетичних установок (ВЕУ). 3. Аналіз схем генерування електроенергії ВЕУ (2 арк.). 4. Класифікація та традиційна будова ВЕУ. 5. Структурна схема побудови ВЕУ на базі БМПС. 6. Математичні моделі електротехнічного комплексу ВЕУ. 7. Система електропривода ВЕУ на основі ПЧ. 8. Система векторного керування ВЕУ. 9. Алгоритм автоматизованого керування ВЕУ. 10. Моделювання роботи БМПС в складі ВЕУ (2 арк.). Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	к. т. н., доц. каф. КЕМСК Нанака О.М.	 24.08.24	 19.11.24
Економічна частина	Шулле Ю.А. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	 24.08.24	 19.11.24

7. Дата видачі завдання 24.08.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

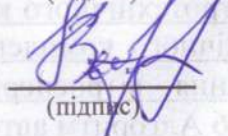
№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	27.08.2024р	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	26.10.2024р	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	02.11.2024р	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	09.11.2024р	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	16.11.2024р	
6	Попередній захист МКР	19.11.2024р	
7	Нормоконтроль МКР	19.11.2024р	
8	Рецензування МКР	02.12.2024р	
9	Захист МКР	18.12.2024р	

Студент


(підпис)

Мателюан. М.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Нанака О.М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

УДК: 620.92

Матевосян М.М. Автономний перетворювач вітроенергетичної установки на базі безконтактної електричної машини. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2024. 110 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 26 назв; рис.: 46; табл. 9.

В магістерській кваліфікаційній роботі були запропоновані рішення щодо розробки автономного перетворювача вітроенергетичної установки на базі безконтактної електричної машини. В основній частині роботи запропоновані математичні та комп'ютерні моделі вітротурбіни малої потужності горизонтальною віссю, безконтактної машини постійного струму, моделювання аеродинаміки вітротурбіни в Simulink та математична модель БМПС в Simulink. Розроблено математичну модель аеродинаміки вітротурбіни з горизонтальною віссю. Складено імітаційну модель вітроустановки в Simulink для різних значень швидкості вітру (6-15 м/с). Запропонована схема векторного керування ВЕУ працює в режимі підтримки максимуму потужності підвищення ККД вітротурбіни, забезпечуючи оптимальну швидкість обертання турбіни. При цьому швидкість обертання турбіни, необхідна для підтримки в системі оптимального значення швидкохідності, що забезпечує максимум потужності, розраховується для конкретного значення швидкості вітру.

Виконано розрахунок ефективності капіталовкладень для впровадження електротехнічного комплексу на основі ВЕУ з МР. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації ВЕУ з МР в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

Графічна частина складається з 14 плакатів із результатами роботи.

Ключові слова: ВЕУ, інвертор, випрямляч, імітаційне моделювання, схема принципова, схема функціональна, будова, класифікація, алгоритм.

ABSTRACT

Matevosyan M.M. Autonomous conversion of a wind power plant based on a non-contact electric machine. Master's thesis in specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, ducational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2024. – 110 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 26 titles; fig.: 46; tabl. 9.

In the master's degree work, solutions were proposed for the development of an autonomous converter of a wind power plant based on a non-contact electric machine. In the main part of the work, mathematical and computer models of a low-pressure horizontal wind turbine, a non-contact stationary jet machine, modeling of the aerodynamics of a wind turbine in Simulink and a mathematical model of the BMPS in Simulink. A mathematical model of the aerodynamics of a wind turbine with a horizontal suspension has been developed. A simulation model of a wind turbine was created in Simulink for different wind speed values (6-15 m/s). The design of the vector curing scheme of the WEU operates in the mode of supporting the maximum tension of the wind turbine CCD, ensuring optimal fluidity of the turbine wrapping. In this case, the fluidity of the turbine wrap, which is necessary to maintain the optimal value of fluidity in the system, which will ensure maximum tension, is designed for a specific value of fluidity in the wind.

The design of the efficiency of capital investment for the development of the electrical complex based on the VEU with MR has been determined. The basic provisions for the safe operation of the VEU with MR in the minds of unruly officials of the absent middle class have been identified.

The graphic part consists of 14 posters with the results of the work.

Key words: VEI, inverter, rectifier, simulation modeling, principle diagram, functional diagram, design, classification, algorithm.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 СИСТЕМА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК.....	9
1.1 Автономні відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) на основі вітроенергетичних установок (ВЕУ).....	9
1.2 Стан та перспективи розвитку вітроенергетики.....	10
1.3 Схеми генерування електроенергії вітроелектричними установками ...	12
1.4 Система стабілізації параметрів вітроенергетичних установок	19
1.5 Висновок.....	22
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ВЕУ ТА ТИПИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН В ЯКОСТІ ГЕНЕРАТОРА	23
2.1 Структурна схема ВЕУ та вибір її типу.....	23
2.2 Динамічна модель безконтактної машини постійного струму.....	29
2.3 Висновок.....	31
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ	32
3.5 Висновки.....	40
4 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	41
4.1 Математична модель вітротурбіни малої потужності горизонтальною віссю.....	41
4.2 Математична модель безконтактної машини постійного струму.....	43
4.3 Моделювання аеродинаміки вітротурбіни в Simulink.....	46
4.4 Розробка математичної моделі БМПС в Simulink.....	49
4.5 Динамічна модель ВЕУ.....	54
4.6 Висновок.....	58

5 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ	
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА БАЗІ БЕЗКООНТАКТНОЇ	
МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	59
5.1 Характеристики системи керування ВЕУ на основі перетворювача частоти.....	59
5.2 Система генерування електроенергії ВЕУ з випрямно-інверторним перетворювачем.....	63
5.3 Система векторного керування ВЕУ	65
6 АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗОВАНОЇ РОБОТИ ВЕУ.....	67
6.1 Висновок.....	68
7 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	69
ВИСНОВКИ.....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	84
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	87
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	92

ВСТУП

В даний час відбуваються концептуальні зміни в системі генерації та розподілу електричної енергії. В зв'язку з виникненням серйозних проблем з енергозабезпеченням багатьох регіонів, подорожчанням палива, труднощами його доставки у віддалені та важкодоступні території, більша увага приділяється розвитку малих або розподілених систем електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Сучасна технологія виробництва електроенергії шляхом використання енергії вітру має ряд проблем, які негативно впливають на підвищення ефективності перетворення енергії. Широко використовуються методи управління вітроенергетичною установкою (ВЕУ), але в умовах швидкозмінних вітрових та електричних навантажень вони не забезпечують належної стабільності частоти обертання ротора вітротурбіни, що негативно впливає на надійність і тривалість безаварійної роботи вітроелектричних агрегатів, економію виробленої електроенергії при власному споживанні, а також на ефективність використання енергії вітру.

Вирішення цих проблем можливе лише за наявності ефективного автоматизованого управління ВЕУ.

Актуальність теми. Вітроустановки (ВЕУ) є одним із швидко розвиваючихся напрямків відновлювальних джерел енергії. Вітроенергетична галузь ряду країн в останні десятиліття успішно конкурує з традиційними електричними станціями. З огляду на тенденцію зростання споживання електроенергії в усьому світі та ймовірність виснаження невідновлюваних енергоресурсів, в найближчому майбутньому вітроенергетична галузь отримає суттєвий розвиток у сфері електрифікації житлових масивів, приватних виробничих підприємств, насосних станцій, телекомунікаційних обладнань та інших автономних електричних систем і комплексів.

Основними характеристиками ВЕУ є порівняльна тихохідність вітроколеса (ВК), мінливість швидкості обертання валів, відносно низький коефіцієнт використання енергії вітру, що залежить від площі ВК. Таким

чином, для раціонального використання енергії вітру необхідно застосувати різні конструктивні виконання ВЕУ з традиційними редукторами та безредукторних агрегатів зі стабілізацією силовими напівпровідниковими пристроями для стабілізації вихідних параметрів електричних величин з метою надійного електропостачання різних споживачів.

Процес виробництва електроенергії в ВЕУ вимагає механічних, електромеханічних та електронних систем автоматичного регулювання для забезпечення необхідної якості електроенергії.

Конструкція сучасних ВЕУ складається з електромеханічних частин, які взаємодіють між собою інерційними силами, що формує завдання розробки системи регулювання та проведення комплексних розрахунків всіх ланок із урахуванням збурень при генеруванні електроенергії.

Аналіз наукових робіт вчених, конструкторів та інженерів свідчить про те, що в системі генерування ВЕУ не до кінця вивчений оптимальний вибір основного устаткування, що не запропонована універсальна схема генерування електроенергії для всіх типів електроприймачів, не наведено варіанти максимального використання енергії вітру в момент різкого збільшення швидкості вітру від допустимого значення. У джерелах також мало інформації та досліджень щодо чіткого визначення стабілізації параметрів ВЕУ за допомогою механічного трансмісійного редуктора.

На основі вищевикладеного, актуальним науково-технічним завданням можна вважати розробку вітроустановок (ВЕУ) з підвищеною енергоефективністю (ККД) та можливістю роботи при низьких швидкостях вітру.

В якості електричних машин для вітрогенератора знайшли широке застосування синхронні генератори з постійними магнітами (СГПМ) завдяки таким перевагам, як висока надійність, підвищений ККД (у порівнянні з асинхронними генераторами, АГ), знижений рівень шуму (у порівнянні з вентильними реактивними генераторами, ВРГ) та швидкий динамічний відгук (механічна постійна часу нижче ніж у АГ та ВРГ). Магнітоелектричне

збудження завдяки наявності постійних магнітів на роторі СГПМ та відсутності обмотки збудження дає відсутність втрат на струм збудження. Крім того, ротор з постійними магнітами спрощує конструкцію та підвищує питому потужність СГПМ.

Об'єктом дослідження магістерської кваліфікаційної роботи є електротехнічний комплекс вітроенергетичної установки з горизонтальною віссю обертання.

Предметом дослідження є методи підвищення енергоефективності вітроустановки з безконтактним генератором постійного струму.

Мета роботи полягає в дослідженні схем генерування енергії ВЕУ та розробці способів підвищення енергоефективності вітрогенераторів із безконтактною машиною постійного струму.

До **задач** магістерської кваліфікаційної роботи можна віднести:

- Провести аналіз схем ВЕУ і розробити на їх основі структурну схему ВЕУ на базі безконтактної електричної машини;
- Розробити технологічну, математичну і імітаційну моделі ВЕУ, провести дослідження ВЕУ для підвищення кутової швидкості вала ВГ в цілях стабілізації вихідної напруги і частоти ВГ;
- Виконати аналіз перехідних процесів ВГ на базі БМПС при зміні швидкості вітроколеса.
- Розробити схему і алгоритм автономного перетворювача для управління ВЕУ з урахуванням раціонального використання вітрових ресурсів.
- Визначити економічну ефективність використання ВЕУ.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань в роботі використовувалися математичний та статистичний аналізи, оптимізація параметрів систем управління, застосовувались програмні засоби обчислення та моделювання, такі як ППП Matlab Simulink, Mathcad, Microsoft Excel.

Наукова новизна одержаних результатів:

- Розроблено систему автоматичного регулювання (САР) вихідний електричної потужності безконтактного генератора постійного струму

(БГПТ), що відрізняється, від відомих, наявністю двох контурів регулювання: зовнішнього контуру регулювання швидкості (КРШ) та внутрішнього контуру регулювання потужності (КРП). При цьому КРШ відповідає за підтримку коефіцієнта використання енергії вітру (КВЄВ) турбіни на максимально можливому рівні, а КРП – стежить, щоб вихідна електрична потужність генератора відповідала механічній потужності на лопатях турбіни.

Практичне значення одержаних у роботі результатів полягає в наступному:

На підставі математичного моделювання вироблено практичні рекомендації до умов роботи перетворювача енергії вітру, за яких, що перетворюється з енергії вітру, генерована електроенергія була б максимальною.

Особистий внесок здобувача. Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи отримано автором самостійно.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2025).

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій:

- До питання використання вітроенергетичних установок на базі безконтактної електричної машини / М.М. Матевосян, О.М. Нанака, О.А. Паянок – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)», [Електронний ресурс]. URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/schedConf/presentations>,

– Вінниця : ВНТУ, 2025. – 4 с.

1 СИСТЕМА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

1.1 Автономні відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) на основі вітроенергетичних установок (ВЕУ)

Сьогодні електростанції, що використовують відновлювані джерела енергії, стають одним із найперспективніших і високотехнологічних способів виробництва електроенергії.

Щороку у світі зростають темпи будівництва нових альтернативних електростанцій, таких як вітрові (ВЕС), сонячні (СЕС), гідроелектростанції (ГЕС) тощо [1, 17, 18].

У найближчому майбутньому автономні відновлювані електростанції можуть витіснити традиційні джерела енергії, такі як теплоелектростанції, що працюють на вугіллі, природному газі та інших невідновлюваних ресурсах. Водночас попит на електроенергію у світі постійно зростає, незважаючи на впровадження енергозберігаючих технологій і використання сучасного енергоефективного обладнання як у побуті, так і в промисловості.

Відомо, що ресурси традиційних невідновлюваних джерел енергії є обмеженими. За прогнозами провідних науковців, їхні запаси можуть почати вичерпуватися вже протягом наступних 70-120 років [2, 12-14]. Активний розвиток будівництва електростанцій, які використовують відновлювані джерела енергії, позитивно впливає на екологічну ситуацію та клімат планети, зменшуючи обсяги викидів токсичних вуглеводневих газів.

Основні конструктивні елементи та обладнання електростанцій, таких як СЕС, ВЕС і ГЕС, що працюють на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ), суттєво різняться залежно від режиму роботи та способу виробництва енергії. Одним із ключових факторів під час їх будівництва є географічні умови, тобто забезпечення достатньої кількості відновлюваних ресурсів у вибраному місці [1, 13].

З урахуванням зазначених особливостей виробництва електроенергії на основі відновлюваних джерел, у роботі акцентується увага на вітроелектричних станціях, які є більш раціональними з точки зору використання земельних ресурсів.

1.2 Стан та перспективи розвитку вітроенергетики

Динаміка використання енергії вітру в світі щорічно збільшується, незважаючи на високі капіталовкладення на будівництво ВЕУ та на сезонний характер виробництва електроенергії. Це пояснюється тим, що вітроенергетика є одним з основних видів електростанцій, які широко використовуються в системі електропостачання сільського господарства, промислового підприємства і застосовуються в якості основного джерела живлення для автономних і сезонних споживачів електроенергії.

Для розвитку вітроенергетики та підвищення потужності енергомереж на основі чистої енергії в ряді країн світу законодавчо встановлюють пільги та фінансові підтримки для підвищення техніко-економічного показника споруджуваних ВЕС [19]. Іншими показниками розвитку даної галузі є подорожчання паливно-енергетичних ресурсів та нерівномірний розподіл енергоресурсу на земній кулі. Наприклад, країнам, які не мають достатньої кількості паливно-енергетичного ресурсу, доводиться купувати газ, нафту в інших країн. Така ситуація призводить до автоматичного подорожчання виробленої електроенергії за рахунок транспортування енергоресурсів.

Тенденція зростання використання енергії вітру спостерігається в усіх точках земної кулі. До початку 2016 року встановлена потужність усіх вітрогенераторів становила 486,8 ГВт, а сумарний виробіток електроенергії на всій ВЕУ в світі – 706 ТВт год. На сьогоднішній день країни, які інтенсивно розвивають галузь вітроенергетики, – це Данія, яка виробляє 42% електроенергії на основі ВЕУ від загальної кількості електрики, що виробляється, Португалія – 27%, Нікарагуа – 21%, Іспанія – 20%, Ірландія –

19%, Німеччина – 8% [1, 13, 17]. В останні роки проектування та дослідження ВЕУ активно спостерігається в Росії, Єгипті, ОАЕ, Китаї, Японії та в деяких країнах Середньої Азії.

Динаміка використання енергії вітру в світі показана на рисунку 1.1. Необхідно відзначити, що незважаючи на тенденцію зростання в світі вироблення електроенергії за рахунок ВЕУ, вартість основного обладнання та капіталовкладення на спорудження ВЕУ не знижуються. Крім того, з економічних міркувань впровадження ВЕУ в систему електропостачання як одного з основних видів джерел енергії призведе до зниження ціноутворення електроенергії від вартості нафти та газу.

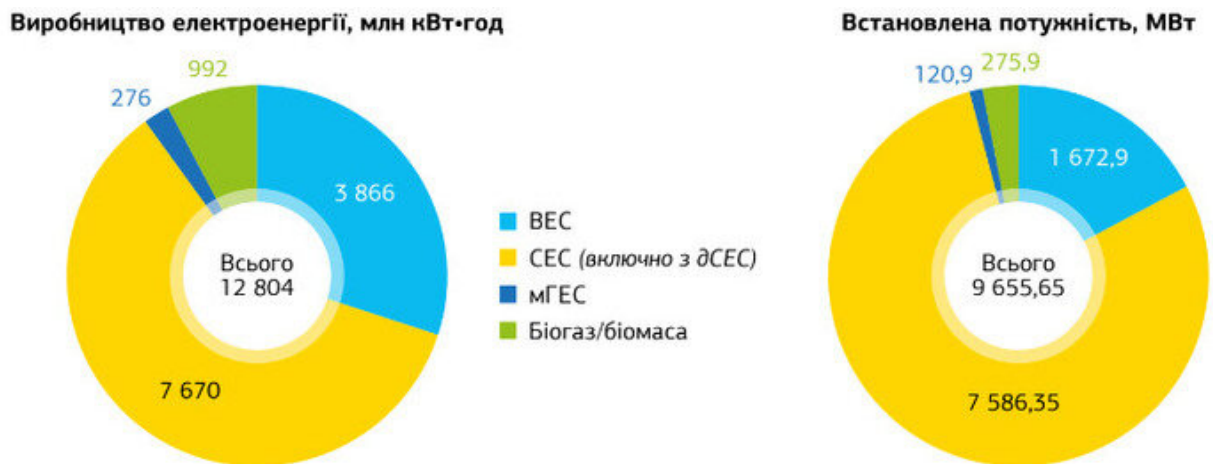


Рисунок 1.1 – Сектор відновлювальної енергетики в Україні

Європейська комісія опублікувала новий сценарій з розвитку енергетичного сектора в країнах Європейського союзу (ЄС) до 2030 року. Діаграма складу нових потужностей європейської енергосистеми з 2010 по 2020 р. приведена на рисунку 1.2 [13, 17, 19].

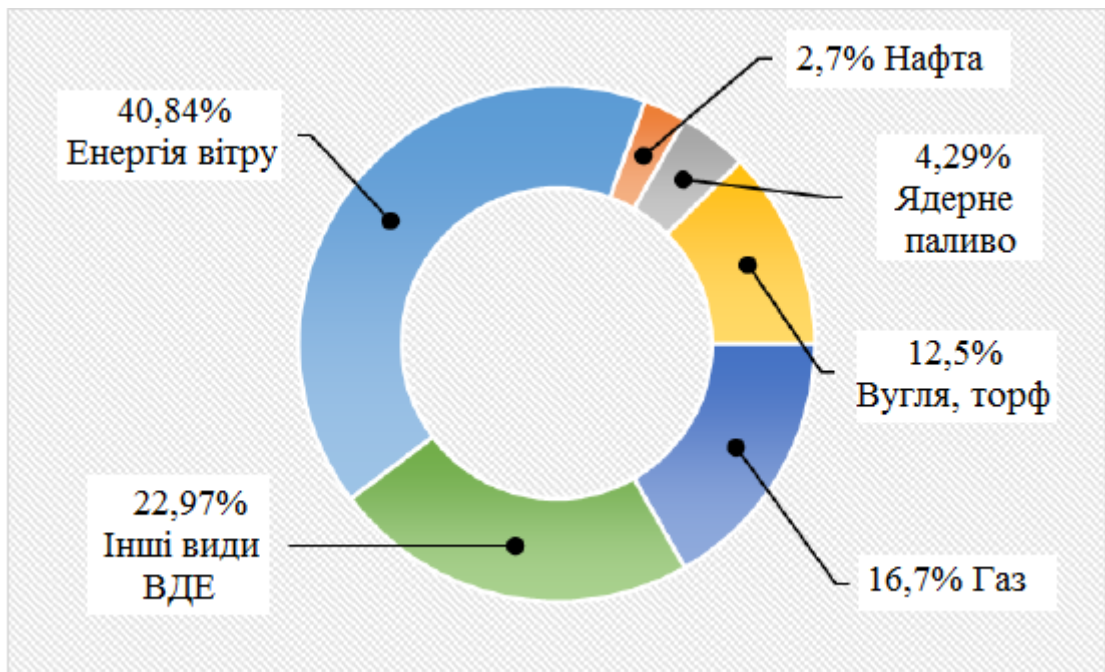


Рисунок 1.2 – Склад енергетичних потужностей ЄЕС до 2020р.

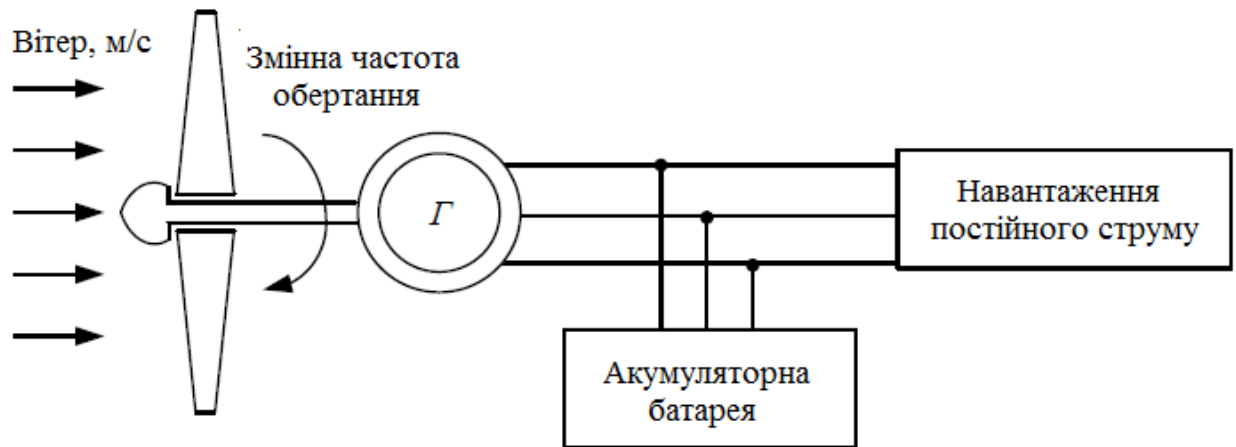
З кругової діаграми можна зробити висновок, що велика увага ЄС приділяє вітроенергетиці як одному з основних видів відновлювальних джерел енергії для електропостачання різних об'єктів народного господарства.

1.3 Схеми генерування електроенергії вітроелектричними установками

Особливість схеми генерування всіх видів ВЕС полягає в раціональному та зручному перетворенні енергії вітру в електричну, механічну і теплову енергію незалежно від змінної частоти обертання вітроколеса (ВК) [1, 17, 18].

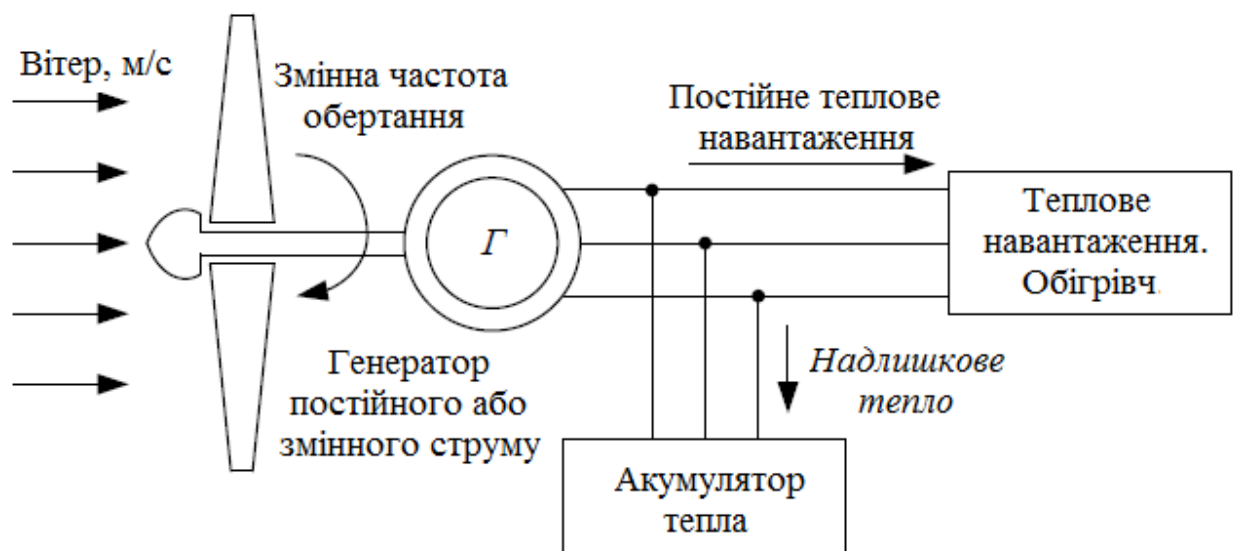
Схема генерації електроенергії вітроенергетичної установки (ВЕУ), яка працює автономно, зазвичай використовується для малопотужних установок, що забезпечують енергопостачання невеликих ферм, приватних будинків, господарств та інших компактних об'єктів. У таких системах немає потреби в підтриманні постійної частоти обертання вітроколеса (ВК), а надлишок

виробленої енергії накопичується за допомогою акумуляторних батарей, підключених до виводів генератора (рисуюнок 1.3).



Рисуюнок 1.3 – Структурна схема генерування енергії ВЕУ

Акумуляування енергії вітру можна здійснювати за допомогою комплексу електричних, теплових та акумуляуючих пристроїв, як це показано на рисунку 1.4. В якості акумулятора тепла та теплового навантаження використовують резистори з великим опором, які не критичні до якості електроенергій.



Рисуюнок 1.4 – Структурна схема генерування енергії ВЕУ з використанням системи обігріву (теплового навантаження)

Для водопостачання споруд та житлових будинків можна використовувати комплекс акумуляційних баків для зберігання води (рисунки 1.5 та 1.6). В таких схемах генерування частота обертання ВЕУ не обов'язково повинна бути постійною, оскільки ємність баку велика і, в разі максимуму швидкості вітру, система захисту насосу автоматично відключається і ВЕУ працює в режимі холостого ходу, тобто без навантаження. У такій системі головну роль відіграють вирівняні графіки навантаження [1, 17, 18]. В моменти максимуму швидкості вітру акумуляторний бак акумулює воду, а під час мінімуму швидкості вітру бак зливає воду споживачам. Режим роботи такої ВЕУ побудований за принципом ГАЕС, але на відміну від них в якості первинної енергії використовується енергія вітру.

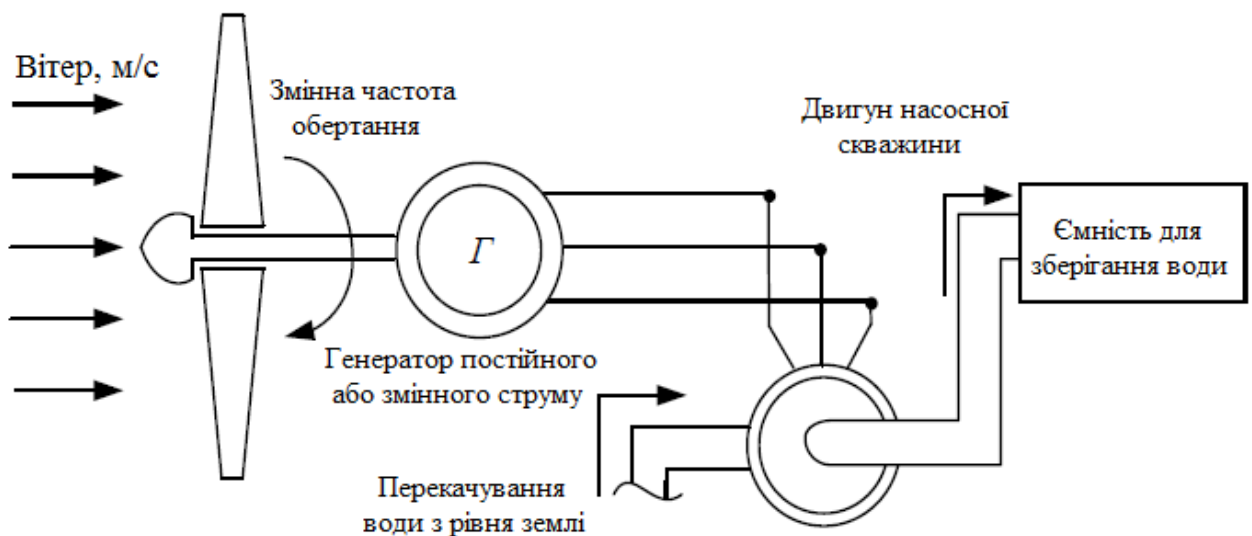


Рисунок 1.5 – Структурна схема генерування енергії ВЕУ з акумулюванням води для водопостачання

Баланс кількості енергії в схемі генерування електричної енергії ВЕУ з використанням насосної свердловини та акумуляції води визначається за формулою:

$$W_{\text{ВЕС}} = W_{\text{ПОТР.}} + W_{\text{БАК.}}, \quad (1.1)$$

де $W_{\text{ПОТР.}}$ – витрата електричної енергії для водопостачання споживачів, кВт год.;

$W_{\text{БАК}}$ – витрата електричної енергії для заповнення ємності з метою акумулювання води, кВт год.

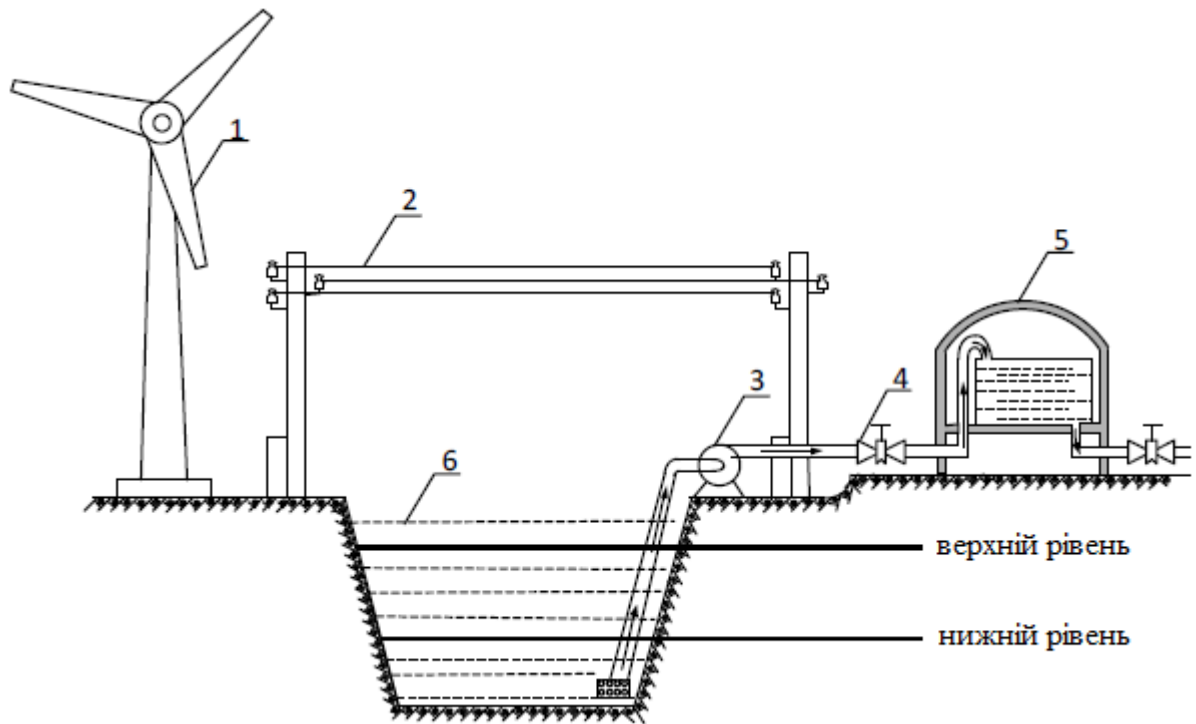


Рисунок 1.6 – Система насосної установки з ВЕУ

На рисунку 1.6 приведені такі позначення: 1 – ВЕУ; 2 – ВЛЕП-380 В; 3 – насос для водопостачання; 4 – засувка води; 5 – акумулююча ємність для води; 6 – водойма, свердловина.

ВЕУ 1 на практиці може знаходитись на певній відстані від насосної станції, залежно від швидкості вітру, але насосна станція встановлюється там, де є потреба здійснювати водопостачання житлових масивів, що створює задачу передачі електроенергії через ВЛЕП.

Для точної оцінки виробітку електроенергії в таких системах необхідно враховувати середню потужність ВЕУ для визначення потужності двигуна насосної станції (рисунок 1.7).

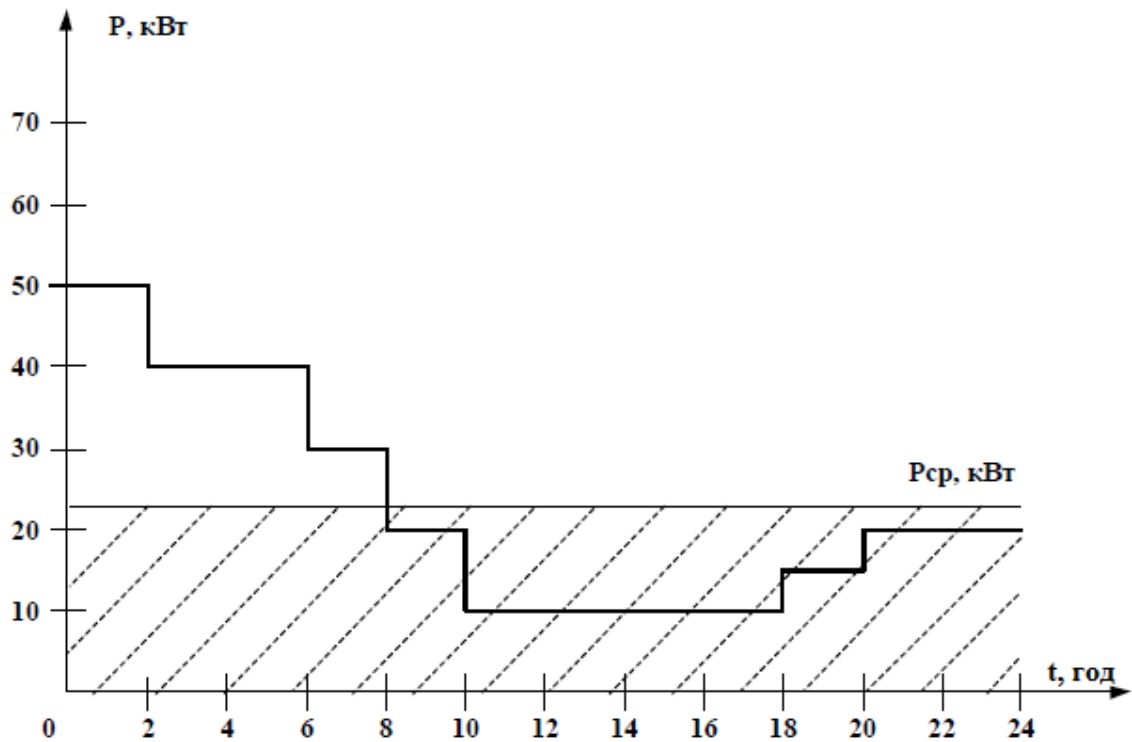


Рисунок 1.7 – Добовий графік генерованої потужності ВЕУ

У схемах вітроенергетичних установок (ВЕУ) зі змінною частотою обертання вітроколеса (ВК) для живлення споживачів постійного струму використовують випрямний пристрій. Надалі за допомогою інверторного перетворювача отримують змінну напругу зі стандартною частотою. Основною особливістю такої схеми є можливість забезпечення на виході інверторного перетворювача змінної напруги з постійною частотою 50 Гц, незалежно від варіацій частоти обертання ВК. До того ж ця схема дає змогу синхронізувати роботу ВЕУ із загальною енергосистемою (див. рисунок 1.8).

Для синхронізації ВЕУ із загальною мережею і при паралельної роботи декількох генераторів ВЕУ необхідно дотримуватися таких умов [1, 18]:

- напруга на виході інвертора ВЕУ має дорівнювати напрузі мережі;
- частота на виході інвертора ВЕУ повинна дорівнювати частоті мережі;
- градуси фази на виході інвертора ВЕУ та мережі повинні бути однаковими;

- форма синусоїдального струму та напруги на виході інвертора повинна відповідати параметрам мережі.

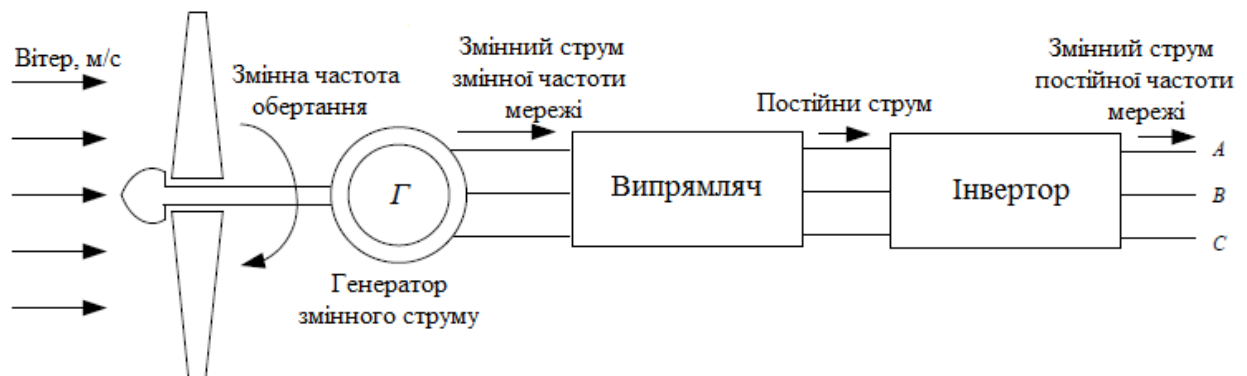


Рисунок 1.8 – Структурна схема генерування енергії ВЕУ з використанням випрямляча та інвертора для теплового навантаження

Схема генерування ВЕУ, включеної безпосередньо до навантаження, в основному застосовується в автономних системах електропостачання, не критичних до зміни напруги та струму і не пов'язаних з необхідністю підключення до загальної мережі.

Така схема використовується для тепlopостачання будинків, сталеплавильних печей і для вироблення додаткової потужності в окремих установках. При цьому знижується графік споживання навантаження невеликих цехів промислових підприємств.

Таку схему (зображену на рисунку 1.9) можна використовувати як один із способів енергозбереження та підвищення економічних показників пром'яприємства.

Інша схема генерування електроенергії в ВЕУ – це регулювання швидкості обертання ротора генератора за допомогою буферного навантаження, яке підключене до ротора генератора постійного струму (рисунок 1.10).

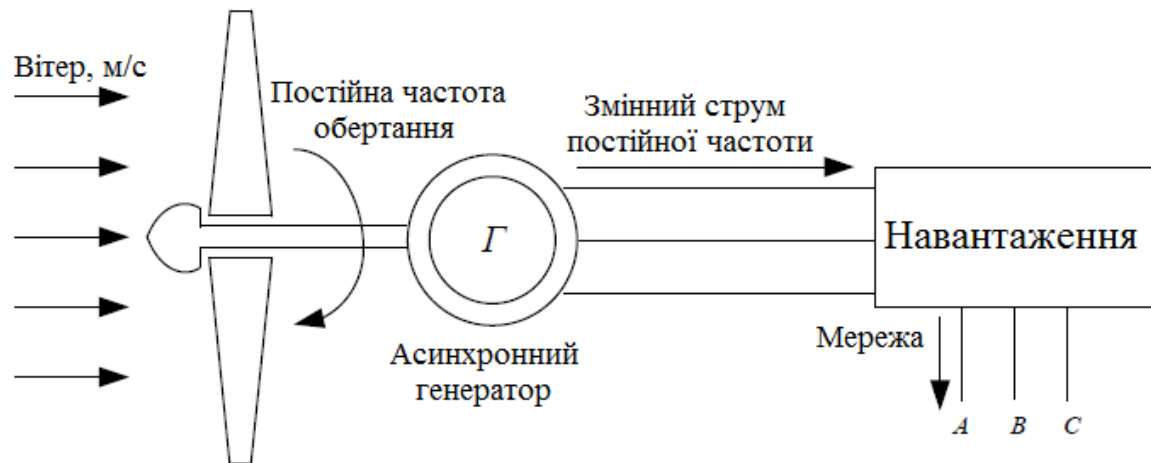


Рисунок 1.9 – Структурна схема генерування енергії ВЕУ

з використанням синхронного генератора

Недоліком даної схеми генерування є великі втрати енергії між контактними кільцями ротора та контактах керуючого резистора. Крім того, у них обмежений діапазон регулювання, який залежить від опору буферного навантаження (резисторів).

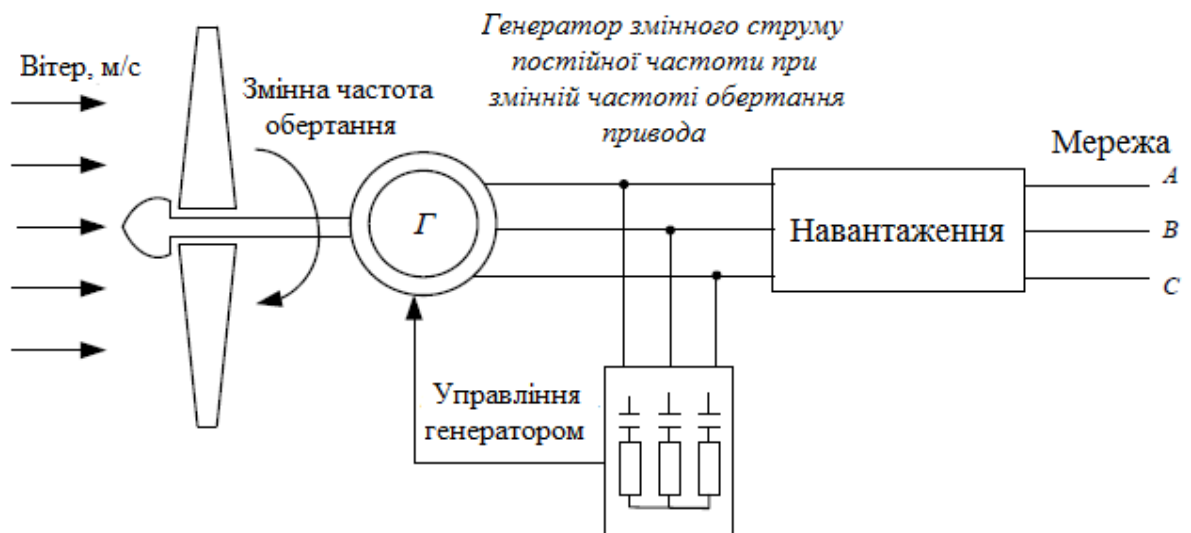


Рисунок 1.10 – Структурна схема генерування енергії ВЕУ

з використанням генератора з керуванням
буферного навантаження

Інша більш ефективна схема генерування електроенергії в ВЕУ – це поєднана система ВЕУ з фотоелектричним перетворювачем. Структурна

схема такої комбінованої системи електропостачання на базі джерел відновлювальної енергетики приведена на рисунку 1.11 [13, 17, 18, 19].

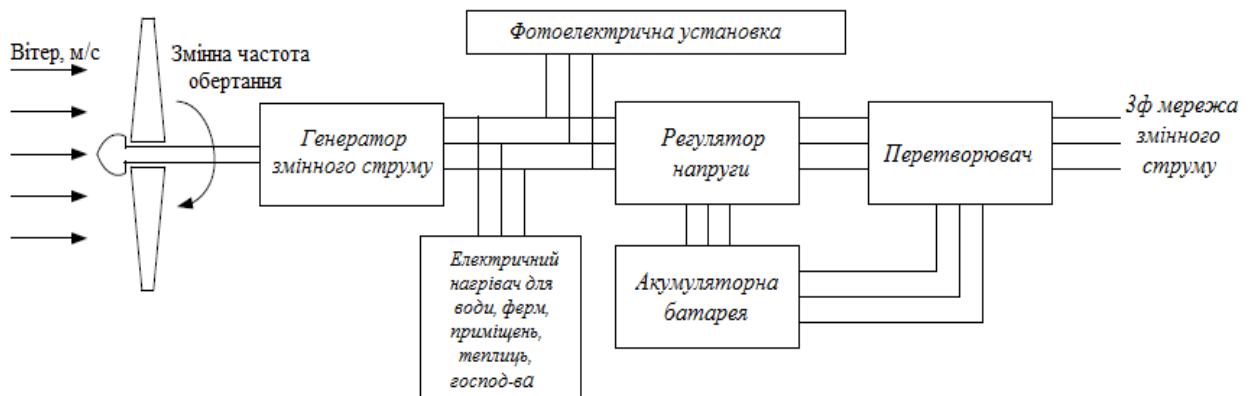


Рисунок 1.11 – Структурна схема генерування енергії ВЕУ сумісно з фотоелектричною установкою

Така суміщена схема має одну загальну систему контролю та перетворення енергії і дозволяє виробити додаткову потужність на основі чистих відновлюваних джерел енергії для електропостачання різних споживачів, включаючи невеликі промпідприємства.

1.4 Система стабілізації параметрів вітроенергетичних установок

На сьогоднішній день для забезпечення максимальної ефективності роботи ВК змінюють частоту його обертання із врахуванням зміни швидкості вітру, при цьому зберігаючи постійним коефіцієнт швидкохідності, для максимальної роботи ВГ.

Для стабілізації вихідних електричних параметрів ВЕУ на сьогоднішній день вдосконалюють і приймають такі способи управління:

1. Механічні системи управління частотою обертання ВЕУ за допомогою адаптивного повороту лопатей досить складні і дорогі, при цьому методі під час стабілізації швидкості обертання ВК спостерігаються скачки напруги на затискачах головного генератора ВЕУ.

2. Чим меншою є частота обертання та потужність ВЕУ, тим більшою є довжина його радіусу, тому тільки дуже малі вітроколеса (радіусом до 2 м) вдається поєднати безпосередньо з генератором. При великих розмірах вітроколеса і при низьких швидкостях обертання доводиться використовувати підвищувальні механічні редуктори, що здорожчує собівартість вітроустановки та її обслуговування.

Крім того, механічні редуктори складаються з важких трансмісійних деталей, що призводить до обваження та жорсткості всіх механічних систем ВЕУ.

Заміною редукторів можуть стати нові типи багатополюсних генераторів, що працюють при малих частотах обертання. При застосуванні таких генераторів не вирішується завдання стабілізації всіх вихідних електричних параметрів ВЕУ при різких скачках швидкості вітру.

3. В деяких конструкціях ВЕУ передбачені з'єднувальні муфти для відключення вітроколеса від вітрогенератора під час збільшення сили вітру.

Живлення споживачів електроенергій здійснюється від акумуляторних батарей. При виникненні такої ситуації, навіть при плавному з'єднанні генератора з вітроколесом, необхідні спеціальні пристрої, що демпфують (пом'якшують), для того, щоб виключити механічні удари, перевантаження та кидки напруги на виході вітрогенератора.

При всіх перевагах та недоліках ВЕУ слід враховувати специфічні вимоги, що пред'являються до стабілізації вихідних електричних параметрів ВЕУ.

Сприятливі вітрові умови, як правило, існують в малонаселених районах, на островах та поблизу берега моря. З огляду на географічні умови земної кулі можна будувати ВЕУ навіть в промислових районах, де спостерігається зростання споживання електроенергії. Крім того, розподіл вітрових ресурсів в залежності від географічних умов не завжди збігається зі зростанням споживання електроенергії.

Сьогодні енергія, вироблена ВЕУ, використовується різними типами електроустановок та обладнання. Наприклад, приймачі та системи опалення й обігріву є менш критичними до коливань напруги та частоти, тоді як освітлювальні та електронні пристрої дуже чутливі до таких змін. Особливу проблему становлять силові й електромеханічні приймачі, такі як електричні машини та насосні агрегати, які через перепади напруги швидко виходять з ладу, що призводить до додаткових витрат на ремонт. Освітлювальні й електронні пристрої також належать до основних споживачів енергії ВЕУ, але їхня робота значно ускладнюється навіть при незначних перепадах параметрів електромережі.

При будівництві ВЕУ необхідно приділити особливу увагу характеру приймачів електроенергії [14]. Залежно від конструкційних елементів та системи управління ВЕУ, собівартість генерованої електроенергії стає як дешевою, так і відносно дорогою, тому при розробці схем управління ВЕУ необхідно максимально використовувати енергію вітру та стабілізувати всі електричні параметри.

Аналіз парку ВЕУ показує, що лише 40-50% з них відповідають стандартним вимогам до якості генерованої електроенергії (наприклад, до частоти). З огляду на ці показники необхідно розробити схему та систему управління ВЕУ зі стандартними вихідними електричними параметрами із врахуванням режиму роботи споживачів для їх надійного та дешевого електропостачання.

1.5 Висновок

З огляду на динаміку використання ВЕУ в світі, необхідно розробити і розрахувати ВЕУ з універсальними конструктивними частинами для електропостачання різних споживачів. У розглянутих схемах генерування електроенергії ВЕУ в основному встановлений редуктор для зміни коефіцієнта редукції, внаслідок чого неможливо якісно змінити коефіцієнт редукції із врахуванням мінливої/швидкозмінної швидкості обертання вітроколеса ВЕУ.

Аналіз схем генерування ВЕУ показав, що всі схеми розроблені з урахуванням характеристики споживачів і немає ніяких універсальних схем генерування енергії, що дозволило б застосувати їх у всіх об'єктах електропостачання, незалежно від роду струму та напруги. Крім того, схеми генерування ВЕУ є складними і з точки зору економічних показників не завжди рентабельні.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ВЕУ ТА ТИПИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН В ЯКОСТІ ГЕНЕРАТОРА

2.1 Структурна схема ВЕУ та вибір її типу

Загальна структурна схема ВЕУ, приведена на рисунку 2.1, формує електромеханічні характеристики різних елементів керування, тобто момент обертання ВГ, і множинні чинники, такі як швидкість вітру, момент інерції на валах, ємність акумуляторних батарей та пропускна здатність керуючого контролера, із врахуванням коефіцієнтів редукції при заданих швидкостях вітряного потоку. При цьому математичний опис всіх параметрів ВЕУ може бути отримано ймовірнісними методами для надійної роботи всієї системи.

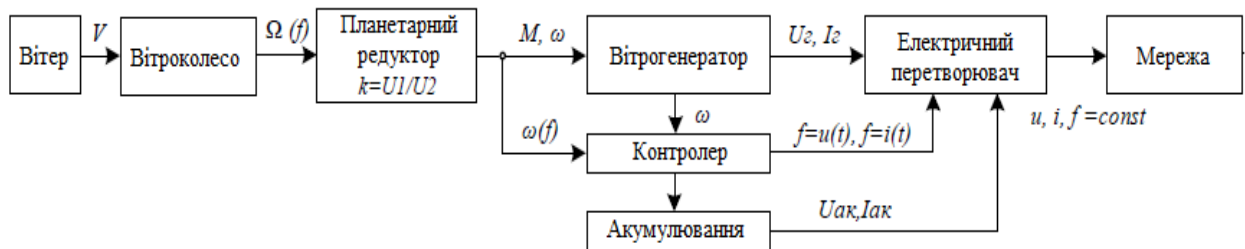


Рисунок 2.1 – Структурна схема моделі ВЕУ

Конструкції лопатей ВЕУ проектують різної форми та довжини, але при проектуванні особлива увага приділяється аеродинамічним характеристикам, легкості та швидкості обертання лопатей при малій швидкості вітру. На сьогоднішній день на ВЕУ встановлюють два типи вітроколеса, швидкохідні малолопатеві і тихохідні багатолопатеві [31].

Трилопатеві ВК з горизонтальною віссю обертання (рисунок 2.2, а) відрізняються з багатополюсних вертикальних лопатей дуже плавним обертанням.

Електрогенератор та редуктор, що з'єднує його з валом ВК, розташовані зазвичай зверху опорної вежі в поворотній головці. З метою обслуговування та ремонту електрогенератор зручно розмістити внизу, але

виникаючі при цьому труднощі з передачею крутного моменту вниз по валах і значні механічні втрати в валах знецінюють перевагу розміщення електрогенератора зверху, всередині основного корпусу, горизонтально до ВК. Багатолопатеві ВК, які розвивають великий крутний момент при слабкому вітрі, використовуються для перекачування води і там, де не потрібна висока частота обертання [1, 13, 17, 18].

ВЕУ з вертикальною віссю обертання внаслідок своєї геометрії при будь-якому напрямку вітру знаходяться в робочому положенні. Крім того, така конструкція дозволяє за рахунок тільки подовження вала встановити редуктор з генераторами внизу вежі, що зручно для обслуговування та заміни. Принциповими недоліками ВЕУ з вертикальною віссю обертання є (рисунок 2.2, б):

1) велика схильність їх до фізичних руйнувань через більш часті автоколивальні процеси;

2) високі пульсації крутного моменту, які призводять до небажаної пульсації валу (ротора) генератора та згодом вихідних електричних параметрів генератора. Із врахуванням такої ситуації переважна більшість вітрогенераторів (ВГ) виконуються за конструкцією горизонтально-осьової схеми. Незважаючи на це, дослідження інерційних та аеродинамічних характеристик ВЕУ з вертикально-осьовими ВК не призупинено.

Швидкохідні вітроколеса зазвичай конструюються з трьома лопатями великих і малих розмірів. Діаметр вітроколеса з великими лопатями досягає до 50 м, а у малих – від 1 до 5 м. Завдяки швидкохідності і плавному регулюванню кількості обертів, вони широко використовуються для електрифікації невеликих споживачів електроенергії, таких як освітлення, акумулювання та обігрів [1, 17].

Тихохідні ВК моментально обертаються при слабкому вітрі і мають великий обертаючий момент. Такі вітроколеса погано підтримують сталість числа оборотів і не можуть застосовуватися в електроосвітленні і електрифікації, але застосовуються в механічних приводах. Крім того,

тихохідні вітроколеса через габаритні розміри не можуть бути потужними відносно ВЕУ із швидкохідними вітроколесами.

З огляду на характеристики швидкохідного та тихохідного ВК широке поширення в усьому світі отримали трилопатеві швидкохідні ВЕУ.

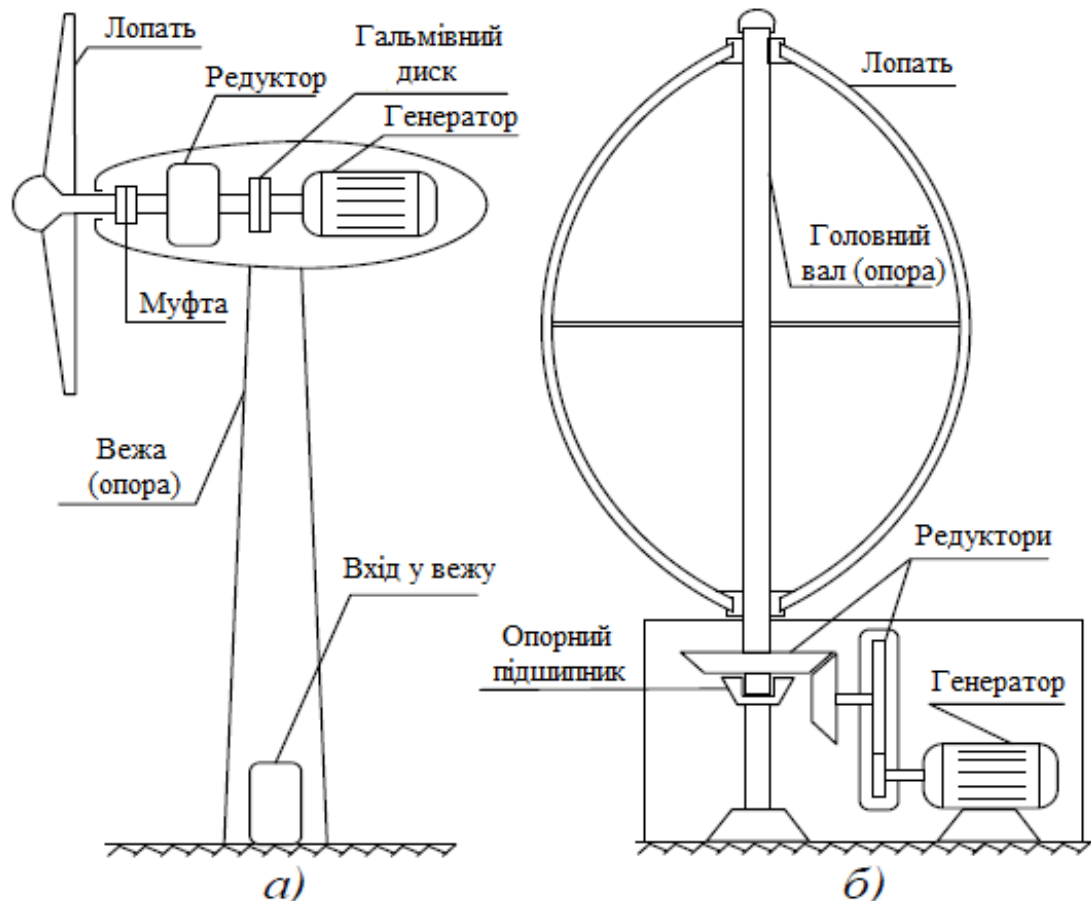


Рисунок 2.2 – Конструкція та основне обладнання ВЕУ:

- а. ВЕУ з горизонтальною віссю обертання;
- б. ВЕУ з вертикальною віссю обертання

Все ВЕУ великої потужності практично є тихохідними в залежності від довжини лопатей, тому для них встановлюють редуктор. Лопаті 4 служать для перетворення енергії вітрового потоку в крутний момент, залежно від потужності ВЕУ довжина лопатей сягає від 1,5 до 20 м.

Електрогенератор 6 є головним компонентом ВЕУ, і для них приймають синхронні і асинхронні генератори різного виконання (Малюнок 1.14, а).

Аналіз основних частин ВЕУ показав, що всі вони на сьогоднішній день є громіздкими і на точність регулювання і стабілізації параметрів частоти і напруги впливають незначно. Клиноременева передача в основному підвищує кутову швидкість і має малий термін служби в порівнянні з мотор-редуктором (рисунок 2.3, б).

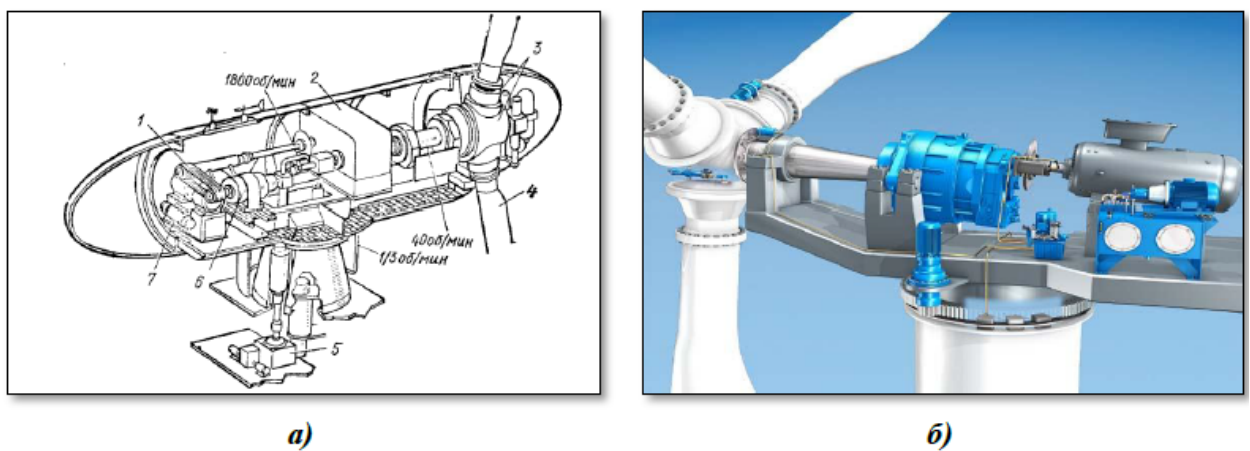


Рисунок 2.3 – Основні механізми ВЕУ великої потужності (100 кВт):

а. ВЕУ із клиноремінним редуктором;

б. ВЕУ з мотор-редуктором (вбудованим планетарним редуктором)

На рисунку 2.3 приведені такі позначення: 1 – клиноремінна передача; 2 – редуктор; 4 – лопаті; 5 – блок керування з системою орієнтації вітроколеса; 6 – електрогенератор; 7 – блок керування гідравлічною системою повороту лопатей.

Широке поширення в усьому світі отримали трилопатеві ВЕУ з горизонтальною віссю обертання. Клиноременева передача 1 з'єднує електрогенератор з валом редуктора для передачі коефіцієнта редукції, редуктор 2 у більшості ВЕУ служить для збільшення частоти обертання електрогенератора і має два вала, ведений і ведучий. Ведений вал з'єднується з валом вітроколеса, а ведучий - з валом електрогенератора. якщо частота

обертання недостатня для обертання ведучого вала, то в таких ВЕУ не встановлюють редуктор [17, 85].

Розглядаючи ВЕУ як систему, що перетворює енергію вітру в інші види, можна описати структурні частини з усіма її елементами. Цикл перетворення енергії вітру в інші види енергії з основними частинами приведений на рисунку 2.4.

Механічна частина. У цій частині відбувається перетворення непостійній енергії потоку вітру в механічну за допомогою ВК, а саме в лопатях. Далі редуктор (мультиплікатор) з основними механізмами, шестернями, основними та ведомими валами, підвищує кутову швидкість, передаючи підвищену кутову швидкість на вал генератора.

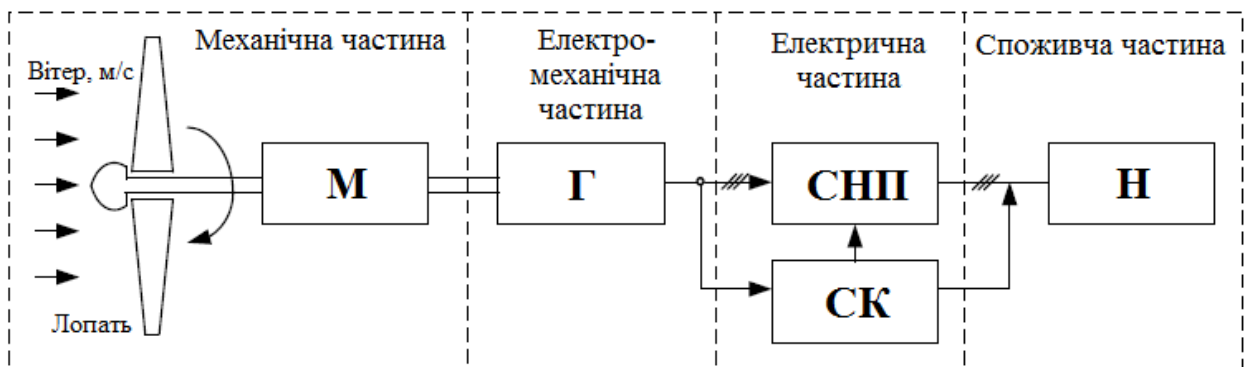


Рисунок 2.4 – Структурна частина схеми ВЕУ

Електромеханічна частина. Ключовим елементом цієї системи є генератор. Генератор, побудований на основі асинхронної або синхронної машини, перетворює крутний момент, що передається від редуктора, на електричну енергію. Через нестабільність крутного моменту редуктора струм і напруга на виході генератора мають непостійні значення. Тому на вал генератора встановлюють комплекс електротехнічного обладнання та датчиків, які забезпечують регулювання й моніторинг параметрів напруги й струму.

Електрична частина. У цій частині сигнал з електромеханічної частини (крутний момент, кутова швидкість, момент, постійність часу струму і напруги якоря машини та ін.) надходить в систему напівпровідникових

приладів (СНП), які складаються з транзисторних перетворювачів та системи керування (СУ), що формують сигнал для регулювання і стабілізації вихідних параметрів напруги та струму СНП.

Споживча частина. Споживча частина складається з приймачів енергії, таких як теплові, електричні та акумулюючі. Залежно від потужності приймачів електроенергії на затискачах генератора виникають зворотні струми, що призводять до нагріву СНП, тому в ВЕУ необхідно передбачити і зворотний сигнал, що залежить від навантаження, підключеного на вихід електричної частини.

Одним з основних обладнань ВЕУ є генератор, тобто електрична машина, яка використовується в якості перетворювача механічної сили потоку вітру в електричну енергію. Класифікація основного обладнання та електричних машин (генератора) сучасної ВЕУ з вертикальною та горизонтальною віссю обертання приведено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Класифікація ВЕУ за типом електричної машини

Генератор в основному вибирають із врахуванням аеродинамічних характеристик ВЕУ, середньорічної швидкості вітру та способу генерування енергії вітру в інші види енергії.

2.2 Динамічна модель безконтактної машини постійного струму

В якості генератора вітроенергетичної установки (ВЕУ) можуть бути використані електричні машини різних типів. До традиційних, добре вивчених різновидів ВЕУ, належать передусім установки на базі синхронних та асинхронних машин. Ці інженерні рішення перевірені багаторічним досвідом та є оптимальними при будівництві великих вітроелектростанцій для роботи на мережу.

Проте останнім часом дедалі актуальнішою стає проблема розробки малопотужних автономних ВЕУ для електропостачання приватних домоволодінь. Водночас виникає необхідність обґрунтованого вибору оптимального конструктивного типу генератора для такої ВЕУ.

Якщо визначити дешевизну як головний критерій для вибору типу генератора ВЕУ, доцільним буде розглянути безконтактну машину постійного струму (БМПТ). Ця машина набула поширення відносно недавно (на початку 2000-х років), і сьогодні активно застосовується як малопотужний привод у жорстких дисках, принтерах, вентиляторах персональних комп'ютерів, електричному інструменті та як тяговий привод електричного транспорту.

Серед переваг БМПС слід зазначити: низькі експлуатаційні витрати та досить широкий діапазон швидкостей. Разом про те, конструктивні особливості БМПС призводять до виникнення небажаних явищ. Так, через трапецеїдальну форму проти-ЕРС, для даної машини характерні пульсації по моменту. І, що важливіше, дискретне живлення статорних обмоток призводить до пульсацій струмом, а, отже, і електричної потужності.

Проблемі використання БМПС як генератора для ВЕУ присвячено загалом дуже багато робіт і тому безліч питань залишається відкритим на дослідження. Тому ми вважаємо за доцільне присвятити дану роботу моделюванню динамічних властивостей ВЕУ на базі БМПТ з метою

розробки системи автоматичного регулювання (САР) вихідної потужності генератора.

Незважаючи на свою назву БМПС не є машиною постійного струму. Насправді ж вона відноситься до класу синхронних машин з постійними магнітами (СМПМ) і виділяється з останніх лише завдяки виконанню обмотки статора і, як наслідок, завдяки формі проти-ЕРС, що наводиться в цій обмотці обертаючимся ротором з постійними магнітами. У той час як у СМПМ проти-ЕРС синусоїдальна, у БМПС вона має форму трапеції. Отже, назва БМПС характеризує не принцип її дії, а спосіб управління (рисунок 2.6).

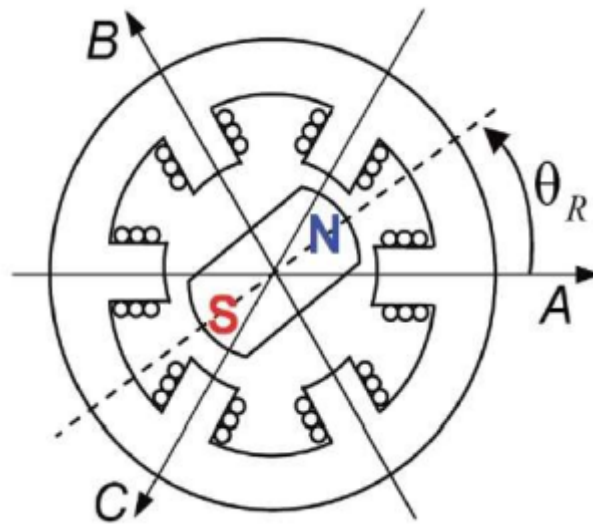


Рисунок 2.6 – Розріз дво полюсної БМПС

БМПС складається з ротора, на який кріпляться постійні магніти, що виконують роль обмотки збудження, і статора, в пази якого укладена трифазна силова обмотка. Статор зазвичай набирається із пластин ламінованої тонколистової сталі з метою зменшення втрат на вихрові струми та гістерезис. Ротор БМПТ може мати різне конструктивне виконання, починаючи від традиційного внутрішнього, закінчуючи зовнішнім або дисковим виконанням. Є відомості, що зовнішнє виконання ротора є оптимальним конструктивним рішенням для побудови малопотужних ВЕУ на базі БМПТ.

Як матеріал для виготовлення постійних магнітів для БМПТ використовуються сплави рідкісноземельних металів (наприклад, неодимовий сплав), так як вони дозволяють досягти більшої щільності магнітного потоку в зазорі і більшої величини електромагнітного моменту при малих розмірах ротора.

Висновок: Для генерування енергії вітру необхідно розглянути та змодельовати комплекс технічних засобів з метою раціонального використання потужності потоку вітру, оскільки градація швидкості вітру є випадковою величиною і діапазон регулювання швидкості ВК є важливим фактором для вибору основного обладнання та систем регулювання.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

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 [14]. Ефективність роботи електростанції оцінюється коефіцієнтом використання встановленої потужності. Це відношення фактичного 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 [14]:

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

3.1 Визначення капітальних вкладень

Ціна кожного із елементів електротехнічного комплексу, а також і їх загальна вартість представлені в таблиці 3.1.

Розрахунок вітрогенератора здійснюється в розрахунку на його номінальну потужність 15 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 3.1 – Кошторис капіталовкладень

Елементи електротехнічного комплексу	Ціна, грн.
Синхронний генератор ГС-15	30800,00
Конструкція ВЕУ, встановлення	19500,00
Перетворювач частоти (мережевий інвертор)	75148,00
Редуктор 1Ц2У 315К-25-12 ЦЦ У1(ВЕУ)	24200,00
AGM аккумулятори EverExceed DP-12200 (6 шт. – 14,4 кВт)	84594,00
Контролер WWS100A-260	38440,00
Додаткові пристрої системи ВЕУ	12300,00
Периферійні пристрої, комутаційні апарати	6800,00
Кабель силовий 4 мм (80м.)	1800,00
Загальна вартість	293582,00
Транспортні витрати та монтажні витрати (13%)	38165,66
Витрати на будівельні роботи (10%)	29358,20
Капітальні витрати (інвестиції)	361105,86

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:

$$C_{\text{дм}} = C_{\Sigma} \cdot 0,13 \text{ (грн.)} \quad (3.1)$$

$$C_{\text{дм}} = 293582 \cdot 0,13 = 38165,6 \text{ (грн.)}$$

Витрати на будівельні роботи (влаштування фундаментів) розраховують виходячи із нормативів витрат на будівництво. Даний

норматив для укрупнення розрахунку приймається рівним 10% від вартості обладнання:

$$C_B = C_\Sigma \cdot 0,1 \text{ (грн.)} \quad (3.2)$$

$$C_B = 293582 \cdot 0,1 = 29358,2 \text{ (грн.)}$$

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

$$A_p = \frac{C_\Sigma \cdot H_A}{100\%}, \quad (3.3)$$

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

$$A_p = \frac{361105,9 \cdot 5\%}{100\%} = 18055,3 \text{ (грн.)}$$

3.2 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:

$$C_3 = C_{30} + C_{3д}, \quad (3.4)$$

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

$C_{3д}$ – додаткова заробітна плата.

$$C_{30} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_C \cdot \beta, \quad (3.5)$$

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

T_1 – годинна тарифна ставка робітника першого розряду. Мінімальна заробітна платня станом на 2023р. не змінювалась і становить 6700 грн., тому розмір годинної тарифної ставки робітника першого розряду приймаємо рівним $T_1 = 40$ 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:

$$\Phi_{\text{еф}} = \varepsilon \cdot Z_{\text{РД}} \cdot Z_{\text{РЗ}} \cdot t_{\text{РЗ}}, \quad (3.6)$$

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

$Z_{\text{РД}}$ – кількість робочих днів за рік ($Z_{\text{РД}} = 250$ днів/рік);

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

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

Таблиця 3.2 – Тарифна сітка працівників

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

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

$$\Phi_{\text{еф}} = 0,5 \cdot 250 \cdot 1 \cdot 1 = 125 \text{ (год./рік)}.$$

$$C_{30} = 1 \cdot 40 \cdot 2,33 \cdot 125 \cdot 1 \cdot 1 = 11650 \text{ (грн.)}.$$

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

$$C_{зд} = 11650 \cdot 0,1 = 1165,0 \text{ (грн.)}.$$

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

$$C_3 = 11650 + 1165,0 = 12815 \text{ (грн.)}.$$

3.3 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 3.3.

Таблиця 3.3 – Графік планових ремонтних робіт

Найменування обладнання	Види ремонтних робіт по місяцях												Трудоміст-ть, люд-год.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Вітрогенератор				10				10				14	34
Система керування (ПЧ)				6				6				12	22
Контролер заряду і АКБ			6				6				8		20
Муфта			8				8				10		8
Кабельна мережа			9				9				12		30
Механічна конструкція ВЕУ				2				2				4	8
	Загальна трудомісткість												122

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:

$$C_{\text{ЗОР}} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{ефр}} \text{ (грн.)}, \quad (3.7)$$

$$C_{\text{ЗОР}} = 40 \cdot 2,7 \cdot 122 = 13176 \text{ (грн.)}.$$

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

$$C_{\text{ЗДР}} = C_{\text{ЗОР}} \cdot 0,2 \text{ (грн.)}, \quad (3.8)$$

$$C_{\text{ЗДР}} = 13176 \cdot 0,2 = 2636 \text{ (грн.)}.$$

Відповідно витрати на оплату праці ремонтного персоналу складатимуть:

$$C_{\text{ЗР}} = C_{\text{ЗОР}} + C_{\text{ЗДР}} \text{ (грн.)}, \quad (3.9)$$

$$C_{\text{ЗР}} = 13176 + 2636 = 15812 \text{ (грн.)}.$$

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

$$C_{\text{К}} = C_{\text{ЗОР}} \cdot 0,15 \text{ (грн.)}, \quad (3.10)$$

$$C_{\text{К}} = 13176 \cdot 0,15 = 1977 \text{ (грн.)}.$$

Величина загальних річних експлуатаційних витрат розраховується наступним чином:

$$C_{\text{В}} = A_{\text{Р}} + C_{\text{З}} + C_{\text{ЗР}} + C_{\text{К}} \text{ (грн.)}, \quad (3.11)$$

$$C_{\text{В}} = 18055,3 + 12815 + 15812 + 1977 = 48660 \text{ (грн.)}$$

3.4 Розрахунок терміну окупності електротехнічного комплексу ВЕУ

Виробіток електричної енергії ВЕУ.

Розрахуємо кількість електроенергії, що виробить ВЕУ за один рік

$$W_{\text{річн.}} = S_{\text{об}} \cdot C_P \cdot P_{\text{ППВ}} \cdot K_{\text{МР}}, \quad (3.12)$$

де C_P – розрахунковий коефіцієнт потужності вітроколеса (ВЕУ 15 кВт) з горизонтальною віссю обертання в робочій точці (приймаємо рівним $C_P = 0,556$);

$S_{\text{об}}$ – площа обертання лопатей, яку охоплює вітроколесо при обертанні (згідно існуючих розрахунків для вітроколеса $S_{\text{об}} = 72,5$).

$P_{\text{ППВ}}$ – природний потенціал вітру Вінницької області на висоті 15 метрів ($P_{\text{п.п.в.}} = 1120 \text{ (кВт} \cdot \text{год/м}^2\text{)/рік}$).

$K_{\text{МР}}$ – 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 $K_{\text{МР}}$ в розрахунках рівним 1,3.

$$W_{\text{річн.}} = 72,5 \cdot 1120 \cdot 0,456 \cdot 1,3 = 48136 \text{ (кВт} \cdot \text{год)}.$$

Виробіток та продаж відновлювальної електричної енергії відбувається згідно [Закону України "Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії" № 514](#).

Відповідно до Постанови від 31 березня 2023 р. № 594 «Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію, вироблену генеруючими установками приватних домогосподарств» величина «Зеленого» тарифу» на електричну енергію, вироблену генеруючими установками приватних домогосподарств, встановлена потужність яких не перевищує 30 кВт та які введені в експлуатацію в період з 01 січня 2020 року по 31 грудня 2024 року, складає 635,07 коп/кВт·год (без ПДВ) Тобто за рік сума складе:

$$Ц_{P_{в\epsilon y}} = 3,08 \cdot W_{\text{річн.}} \quad (3.13)$$

$$Ц_{P_{в\epsilon y}} = 6,3507 \cdot 48136 = 305664 (\text{грн.}).$$

Термін окупності розраховуємо за виразом:

$$T_{\text{ок}} = \frac{C_{\Sigma} + C_{\text{дм}} + C_{\text{б}}}{Ц_{P_{в\epsilon y}} - C_{\text{б}}} \quad (3.14)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{293582 + 38165,6 + 29358,2}{305664 - 48660} = \frac{361105,8}{257004} = 1,4 (\text{роки}).$$

3.5 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 1,4 роки завдяки використанню ефективних можливостей системи керування в складі вітроенергетичної установки.

4 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

4.1 Математична модель вітротурбіни малої потужності горизонтальною віссю

Математичний опис вітротурбіни необхідний для математичного моделювання з метою оцінки швидкості, максимізує потужність турбіни та ККД системи.

Розглянемо ідеалізовану вітротурбіну (ВТ). Прийmemo такі припущення: вважатимемо, що з обертанні турбіни немає стиснення повітря, а втрати потужності в редукторі та інверторі відсутні. Враховуються лише втрати потужності, обумовлені наявністю потоку повітря, що видується, на виході турбіни, який не бере участі в створення моменту.

У роботі пропонується модифікована математична модель, що враховує коефіцієнт C_p використання потужності, а також дозволяє керувати потужністю за рахунок зміни кута атаки β . Ця математична модель використана для розрахунку оптимального за рівнем вихідної потужності значення швидкохідності λ .

ККД ВТ залежить від орієнтації турбіни щодо потоку повітряних мас та її аеродинамічних характеристик. Коефіцієнт C_p залежить від відношення швидкості лопатей v_b та швидкості вітру v_w – швидкохідності турбіни λ . Її значення визначається рівнянням (4.1):

$$\lambda = \frac{v_b}{v_w} = \frac{\omega \cdot R}{v_w}, \quad (4.1)$$

де R – значення радіусу турбіни (м);

ω – кутова швидкість у валу турбіни (рад/с).

Залежності швидкохідності і коефіцієнта використання потужності C_p від кута атаки можуть бути отримані з прямих вимірювань працюючої турбіни.

Точне визначення величини C_p потребує складного математичного опису. Розвиваємий турбіною крутний момент можна уявити, як функцію від швидкості вітру V_w , діючого на лопаті турбіни, геометричних розмірів та коефіцієнта використання потужності C_p :

$$T_T = \frac{1}{2\lambda} \cdot \rho \cdot A_t \cdot R \cdot V_w^2 \cdot C_p(\lambda, \beta). \quad (4.2)$$

Динаміка вітротурбіни може бути описана як двомасова система, при цьому одна з мас представлена ротором турбіни, а друга ротором генератора.

Вали турбіни та генератора з'єднуються безпосередньо (прямий привід) або за допомогою редуктора. Інерційності мас роторів із валами, створені при обертальному русі, враховуються моментами інерції. Явище пружності (кручення валів та демпфування) враховується в динамічній моделі механічного руху генератора та турбіни. На рисунку 4.1 показана схема двомасової системи генератора та турбіни.

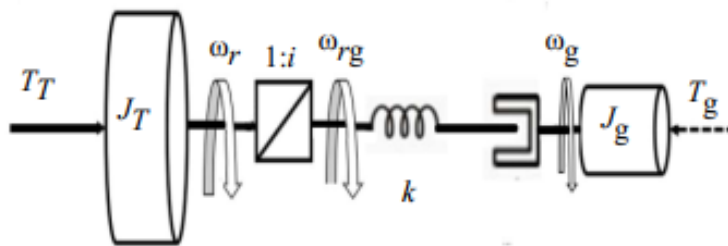


Рисунок 4.1 – Схема двомасової системи генератора та турбіни

Двомасова модель (рисунок 4.3) описується такими рівняннями:

$$\begin{aligned} T_{Tg} &= i^{-1} \cdot T_T, \\ \omega_{rg} &= k \cdot \omega_R, \\ \sum J_{Tg} &= J_g + k^{-2} \cdot J_T, \end{aligned} \quad (4.3)$$

де J_g – момент інерції генератора;

T_g – момент на валу генератора, який залежати від навантаження (від вихідної електричної потужності);

T_T – крутний момент турбіни, від коефіцієнта використання потужності та швидкості вітру;

J_T – момент інерції вітротурбіни;

ω_{rg} – частота обертання ротора генератора ($i \cdot \omega_T$);

i – коефіцієнт редукції (або коефіцієнт множення швидкості);

ω_R – частота обертання турбіни;

ω_g – частота обертання генератора;

T_{Tg} – крутний момент турбіни, що передається до валу генератора;

$\sum J_{Tg}$ – сумарний момент інерції генератор та вітротурбіни;

k – Коефіцієнт пружності валу.

Таким чином, рівняння обертального руху можна описати наступним виразом:

$$T_{Tg} - T_g = \sum J_{Tg} \cdot \frac{d\omega_{rg}}{dt}. \quad (4.4)$$

Рівняння 4.4 враховує тільки динаміку обертального руху ротора турбіни, крученням та демпфуванням валів знехтували.

4.2 Математична модель безконтактної машини постійного струму

Математична модель, яка найбільш повно описує всі особливості роботи електронного комутатора при формуванні напруги живлення БМПС має вигляд:

$$\begin{cases} u_a = R_{ph} \cdot i_a + L_{ph} \frac{di_a}{dt} + e_a + u_n; \\ u_b = R_{ph} \cdot i_b + L_{ph} \frac{di_b}{dt} + e_b + u_n; \\ u_c = R_{ph} \cdot i_c + L_{ph} \frac{di_c}{dt} + e_c + u_n; \\ u_n = \frac{1}{3} [u_a + u_b + u_c - (e_a - e_b - e_c)]; \\ M_{EM} = k_t \cdot (i_a \cdot e_{1a} + i_b \cdot e_{1b} + i_c \cdot e_{1c}), \end{cases} \quad (4.5)$$

де R_{ph} – фазний опір обмотки статора;

L_{ph} – індуктивність обмотки статора;

$i_{a,b,c}$ – миттєві значення струмів, що протікають у фазах А, В, С статорної обмотки відповідно;

$u_{a,b,c}$ – миттєві значення напруги, поданої на фази А, В, С статорної обмотки відповідно;

$e_{a,b,c}$ – миттєві значення протиЕРС, наведених у фазах А, В, С статорної обмотки відповідно;

u_n – напруга нейтралі;

M_{EM} – електромагнітний (генераторний) момент, що розвивається БМПС;

k_t – коефіцієнт моменту БМПС;

$e_{1a,1b,1c}$ – поодинокі функції форми проти-ЕРС у фазах А, В, С статорної обмотки відповідно.

Фазна протии-ЕРС БМПС формується за рівняннями:

$$\begin{cases} e_a = k_e \omega_R \cdot e_{1a}; \\ e_b = k_e \omega_R \cdot e_{1b}; \\ e_c = k_e \omega_R \cdot e_{1c}, \end{cases} \quad (4.6)$$

де k_e – коефіцієнт проти-ЕРС;

ω_R – кутова швидкість обертання ротора.

Для випадку роботи БМПС в генераторному режимі рівняння руху набуде вигляду:

$$M_{wt} - M_{EM} = j_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega_R}{dt}, \quad (4.7)$$

де M_{wt} – момент, що створюється на валу генератора лопатями вітротурбіни;

j_{Σ} – сумарний момент інерції ротора БМПС та рухомих частин турбіни.

Вихідна електрична потужність БМПС-генератора визначається за такою формулою:

$$P_{el} = e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c. \quad (4.8)$$

Система рівнянь (4.5) не враховує наявності інвертора між ланкою постійного струму і БМПС, тому не здатна описати процеси, що протікають при комутації фази. Пропонується спосіб опису роботи керованого інвертора за допомогою таблиці 4.1.

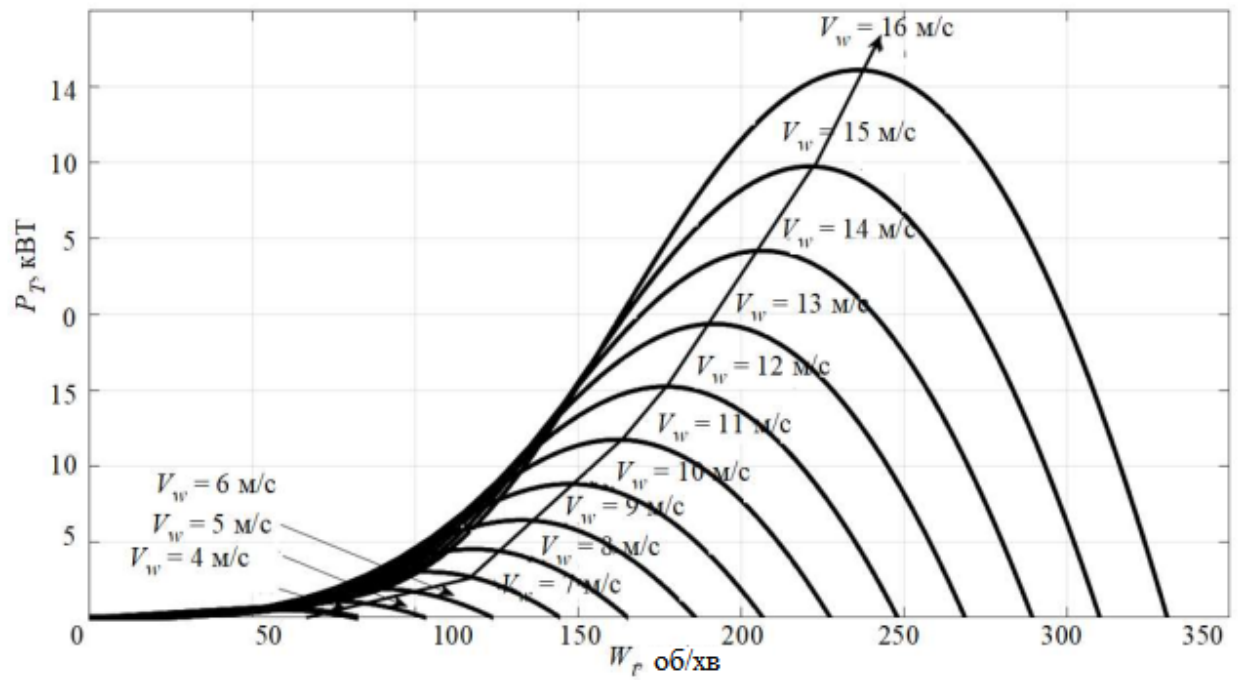
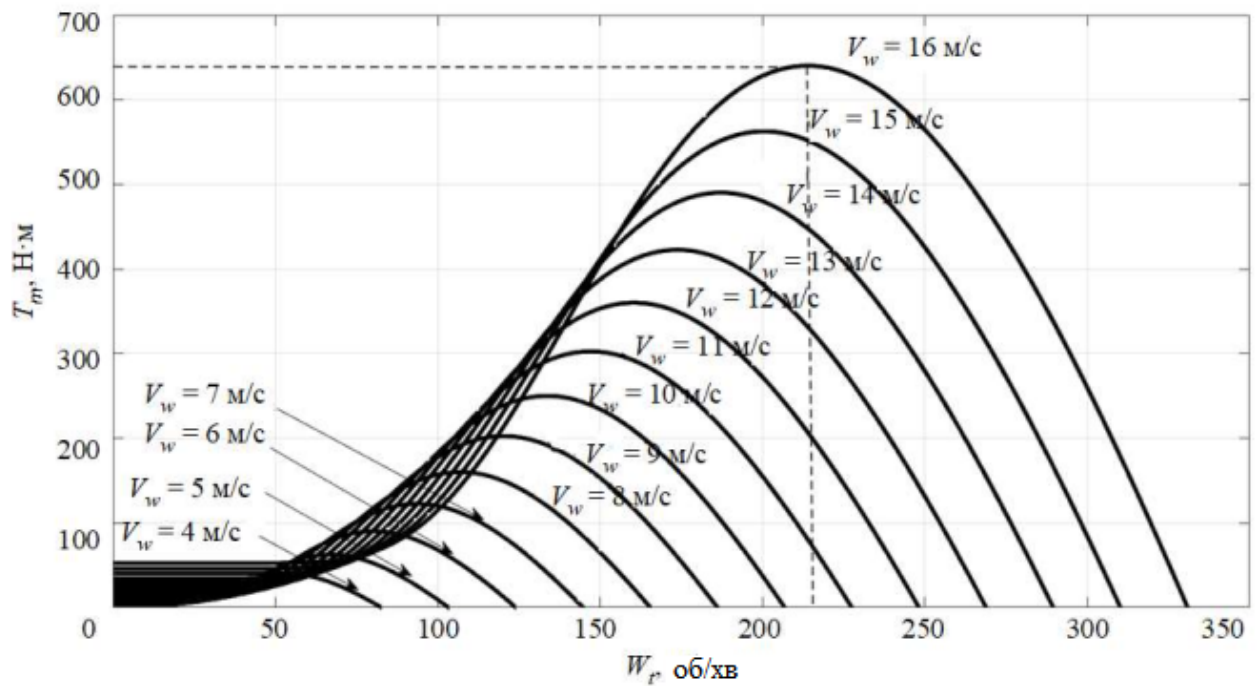
Таблиця 4.1 – Математичний опис роботи керованого інвертора

Сектор	u_a		u_b		u_c	
	Комутація	Встановлений режим	Комутація	Встановлений режим	Комутація	Встановлений режим
1	$\frac{2}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_a + e_b}{2}$	$-\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{-U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_a + e_b}{2}$	$-\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	e_c
2	$\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_a + e_c}{2}$	$\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	e_b	$-\frac{2}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{-U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_a + e_c}{2}$
3	$-\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	e_a	$\frac{2}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_b + e_c}{2}$	$-\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{-U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_b + e_c}{2}$
4	$-\frac{2}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{-U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_a + e_b}{2}$	$\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_a + e_b}{2}$	$\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	e_c
5	$-\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{-U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_a + e_c}{2}$	$-\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	e_b	$\frac{2}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_a + e_c}{2}$
6	$\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	e_a	$-\frac{2}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{-U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_b + e_c}{2}$	$\frac{1}{3}U_{dc} + \frac{e_{\Sigma}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{2}S_{pwm} + \frac{e_b + e_c}{2}$

В таблиці 4.1 приведені позначення:

U_{dc} – напруга ланки постійного струму;;

S_{PWM} – вихідний сигнал ШІМ.

Рисунок 4.3 – Блок обчислення коефіцієнта C_p Рисунок 4.4 – Блок обчислення коефіцієнта C_p

Кожному значенню швидкості вітру відповідає певна частота обертання, що забезпечує максимальну потужність турбіни. Алгоритм, який забезпечує перехід між механічними кривими за значеннями максимумів, називається відстеженням точки максимуму потужності (MPPT).

На рисунку 4.3 показаний перехід по точках максимуму вихідної потужності вітротурбіни для діапазону швидкості вітру (від 4 до 16 м/с) у вигляді суцільної кривої. Отримана крива є типовою залежністю механічної потужності вітротурбіни від частоти обертання при відстеженні точки максимальної потужності. При зміні швидкості вітру та частоти обертання турбіни та постійному вугіллі атаки лопатей ($\beta = 0$) отримана максимальна потужність на виході турбіни становить 14,5 кВт і спостерігається при швидкості вітру $v_w = 16$ м/с.

З рисунку 4.4 випливає, що при куті атаки лопатей $\beta = 0$ варіювання швидкості вітру (не більше від 4 до 16 м/с) і частоти обертання турбіни, максимальне значення механічного моменту вітротурбіни становить $T_m = 640$ Нм і спостерігається при швидкості вітру $v_w = 16$ м/с.

На рисунку 4.5 приведені аеродинамічні характеристики (залежності коефіцієнта використання потужності C_p від швидкохідності λ), пунктирна лінія відповідає значенню $\beta = 0$, суцільна крива – $\beta = 6$. Максимальне значення коефіцієнта використання потужності вітру досягається при нульовому куті атаки лопатей і становить 0,48 величина швидкохідності при цьому дорівнює 6.

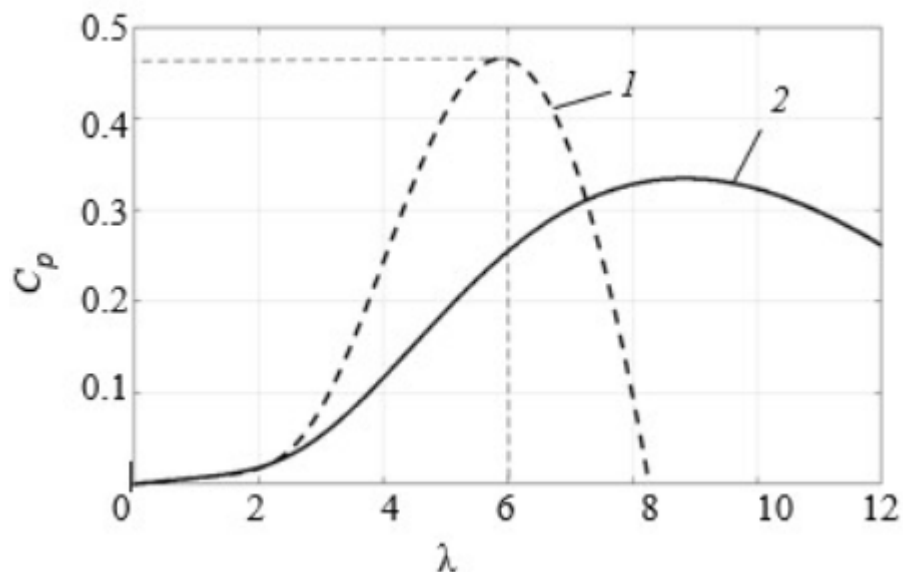


Рисунок 4.5 – Аеродинамічні характеристики вітротурбіни

Фізично, що більше β (кут атаки), то менше відповідна ефективна площа потоку вітру. З рисунку 4.5 видно, що збільшення β тягне зменшення C_p (коефіцієнта використання потужності). Таким чином, для кожного значення існує значення швидкохідності (оптимальне), при якому коефіцієнт використання потужності максимальний.

4.4 Розробка математичної моделі БМПС в Simulink

Тепер, коли ми маємо повний математичний опис БМПС, електронного комутатора та інвертора, можемо приступити до реалізації відповідної моделі в середовищі MATLAB/Simulink.

Загальна структура моделі приведена на рисунку 4.6. Модель, описує електродинамічні, електромеханічні та механічні процеси, що протікають у БМПС, приведена на рисунку 4.7. Модель, що описує процес формування трапецеїдальної проти-ЕРС приведена на рисунку 4.8.

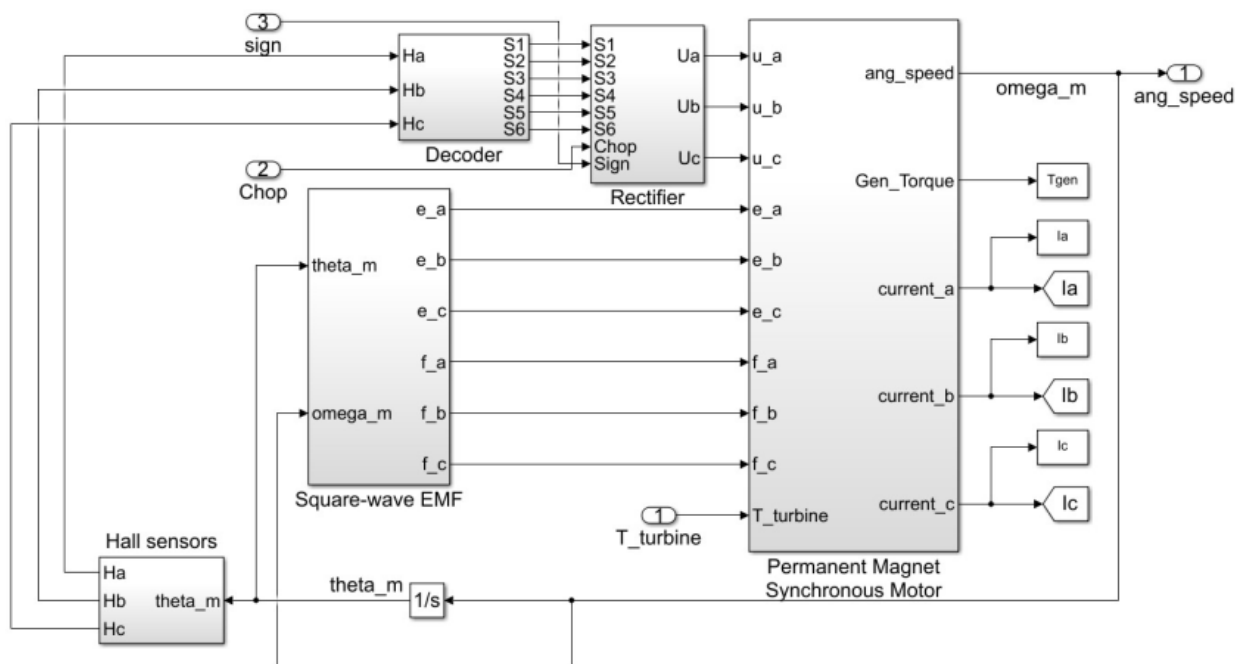


Рисунок 4.6 – Загальна структура моделі БМПС

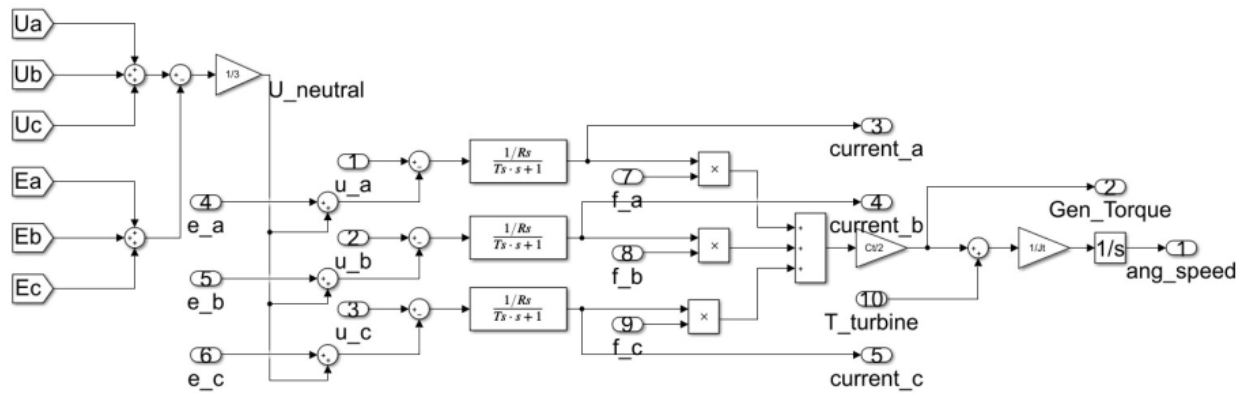


Рисунок 4.7 – Модель електродинамічної, електромеханічної та механічної частини БМПС

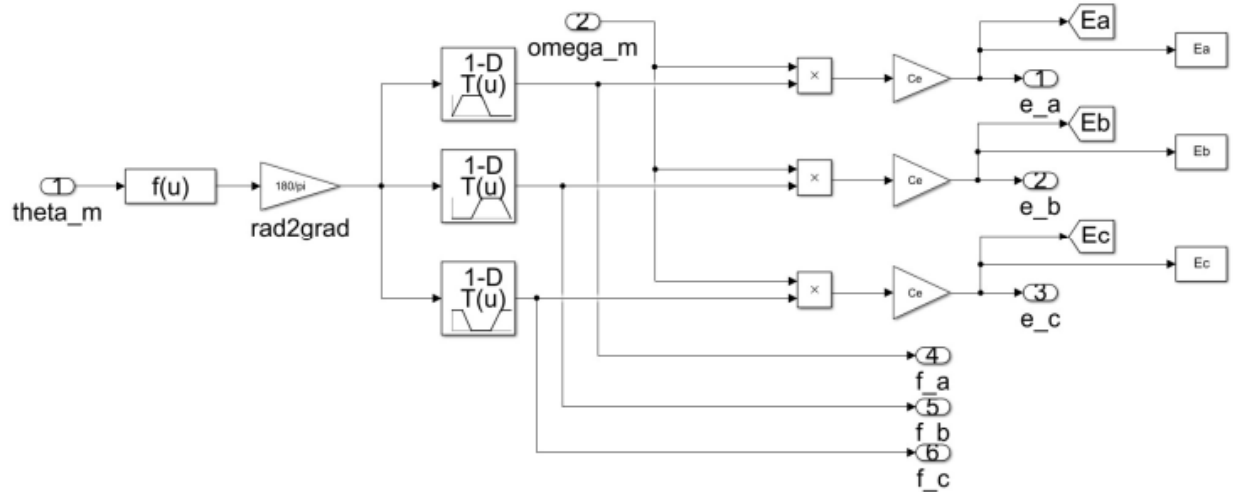


Рисунок 4.8 – Модель генерації трапецеїдальної проти-ЕРС

Модель інвертора через її громіздкість наведемо лише для першої секції, маючи на увазі, що принцип її побудови інших секцій цілком аналогічний (рисунок 4.9, рисунок 4.10).

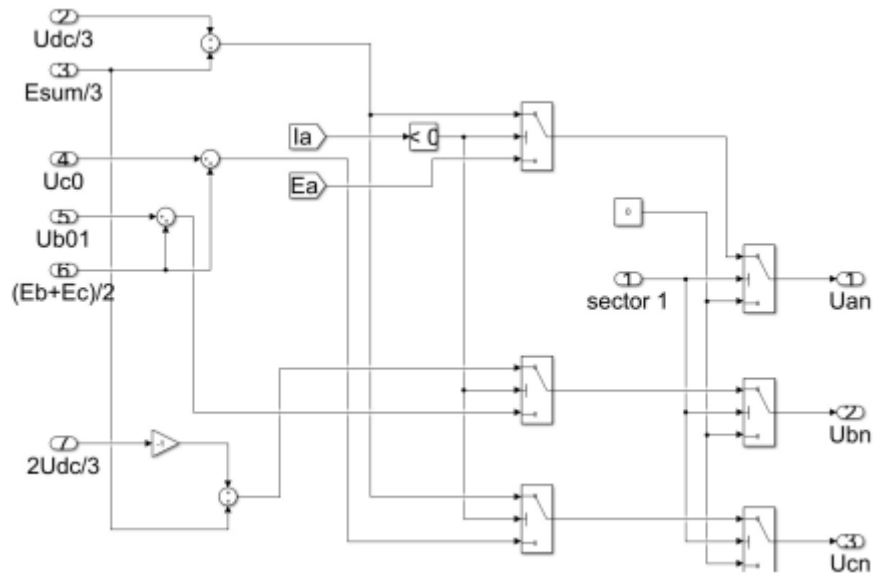


Рисунок 4.9 – Модель роботи керованого інвертора для першої секції

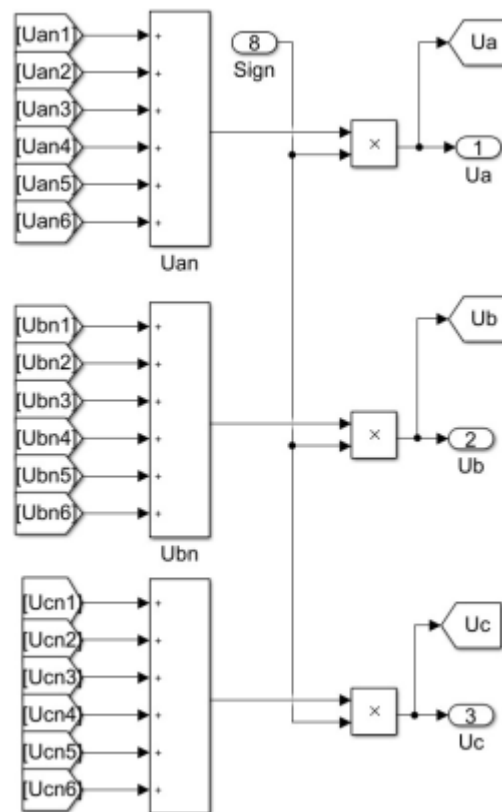


Рисунок 4.10 – Підсистема, що підсумовує результати роботи секцій інвертора

В якості генератора будемо використовувати безконтактний двигун постійного струму (БДПС) моделі НРМ-20KW фірми Golden Motor.

Для того, щоб переконатися в коректності отриманої моделі, промодельюємо пуск БМПС в режимі двигуна вхолосту з наступним накидом номінального навантаження (у момент часу 2.5 с). Побудуємо графіки перехідних процесів за швидкістю (рисунок 4.11), моментом (рисунок 4.12) і струму (рисунок 4.13, 4.14).

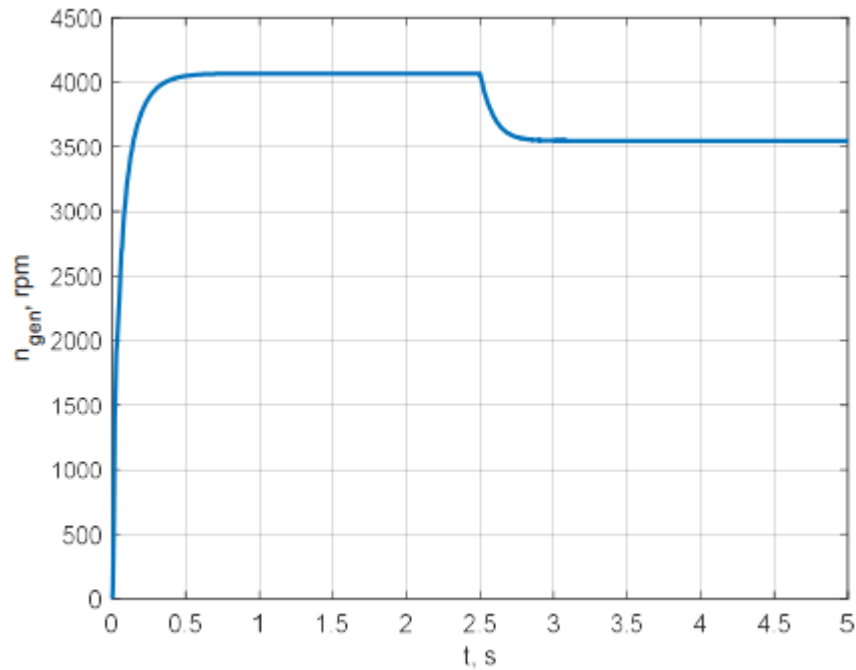


Рисунок 4.11 – Перехідний процес за швидкістю БМПС

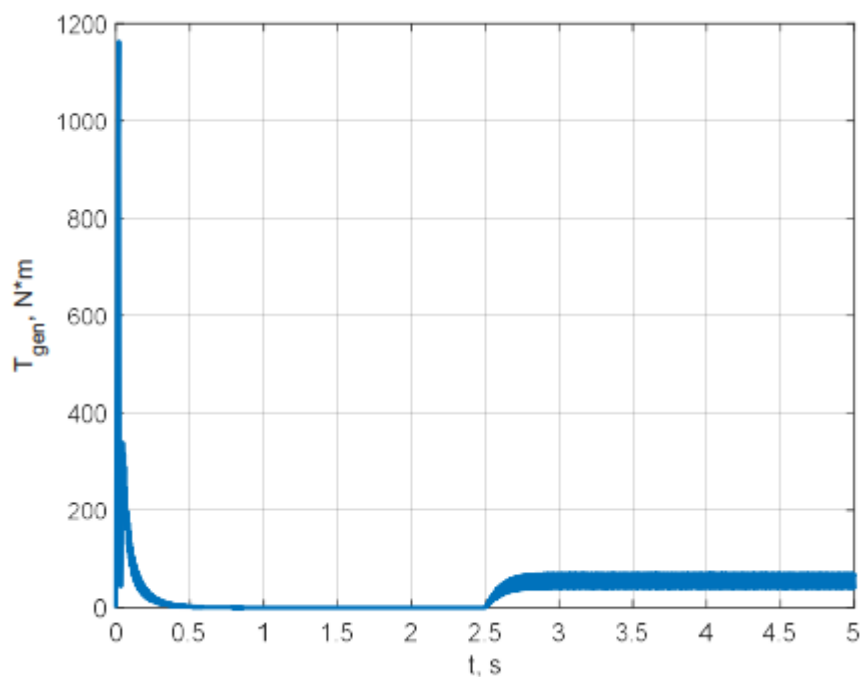


Рисунок 4.12 – Перехідний процес на момент БМПС

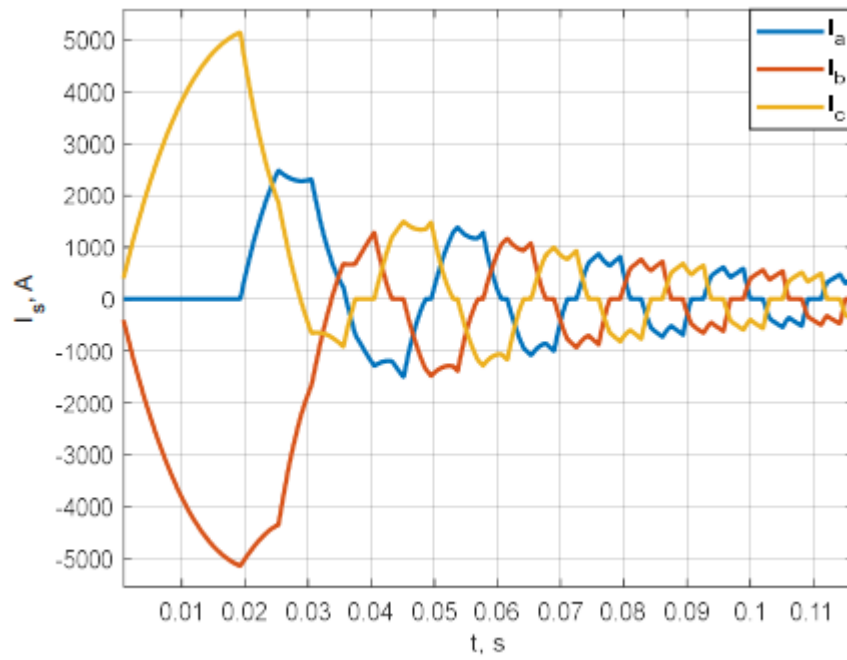


Рисунок 4.13 – Перехідний процес по фазних струмах БМПС при пуску машини вхолосту

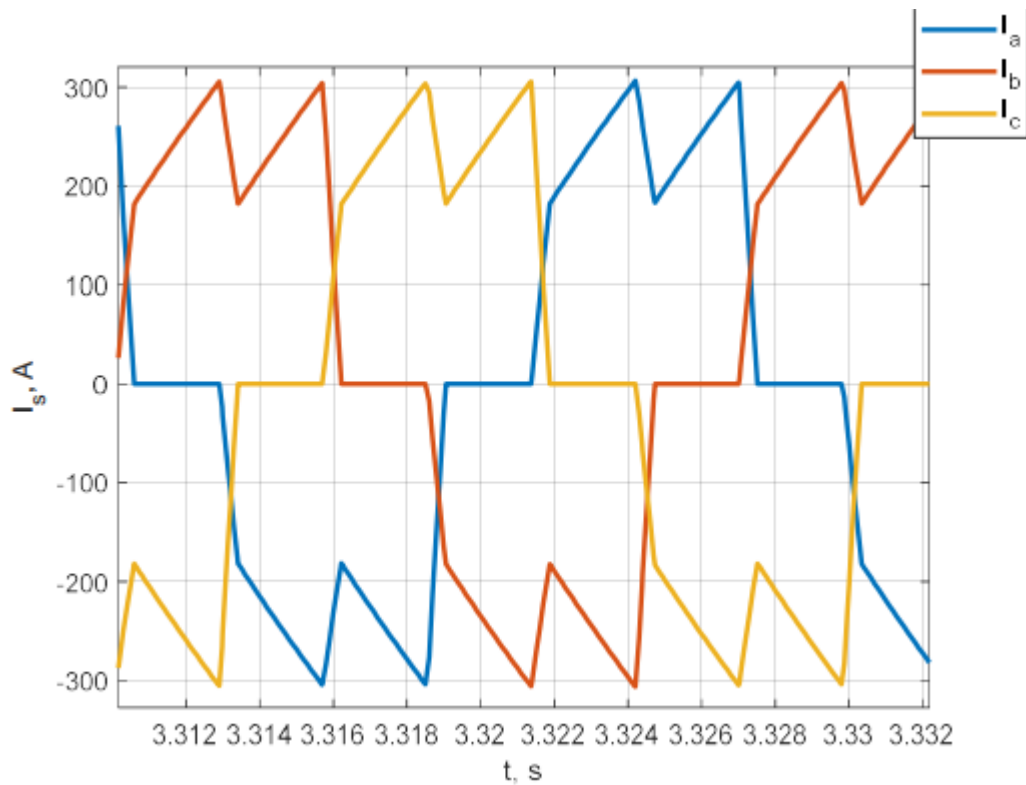


Рисунок 4.14 – Графіки фазних струмів БМПС у встановленому режимі номінального навантаження

Отже, проаналізувавши графіки, зображені на рисунках 2.11 – 2.14 бачимо, що Simulink-модель дала результати, які збігаються з паспортними

даними обраної БМПС. Форма перехідних процесів по струму також збігається з математичним описом та з теоретичними відомостями про БМПС. Все це свідчить про адекватність побудованої моделі реального об'єкта.

4.5 Динамічна модель ВЕУ

Вибір оптимальних параметрів ВЕУ на основі відомих параметрів генератора та формування відповідних практичних рекомендацій буде одним із завдань, поставлених нами в магістерській роботі. Тому в даній роботі ми не будемо прив'язуватися до конкретної моделі турбіни, а натомість спробуємо підібрати параметри турбіни експериментально, виходячи з відомих параметрів БМПС Golden Motor HPM-20KW

Отже, як подальший об'єкт дослідження розглядаємо горизонтально-осьову ВЕУ з трьома лопатями, призначену для автономної роботи.

Функціональна схема, що відображає принцип дії автономної ВЕУ на базі БМПС, суміщена з діаграмою потужностей, приведена на рисунку 4.15.

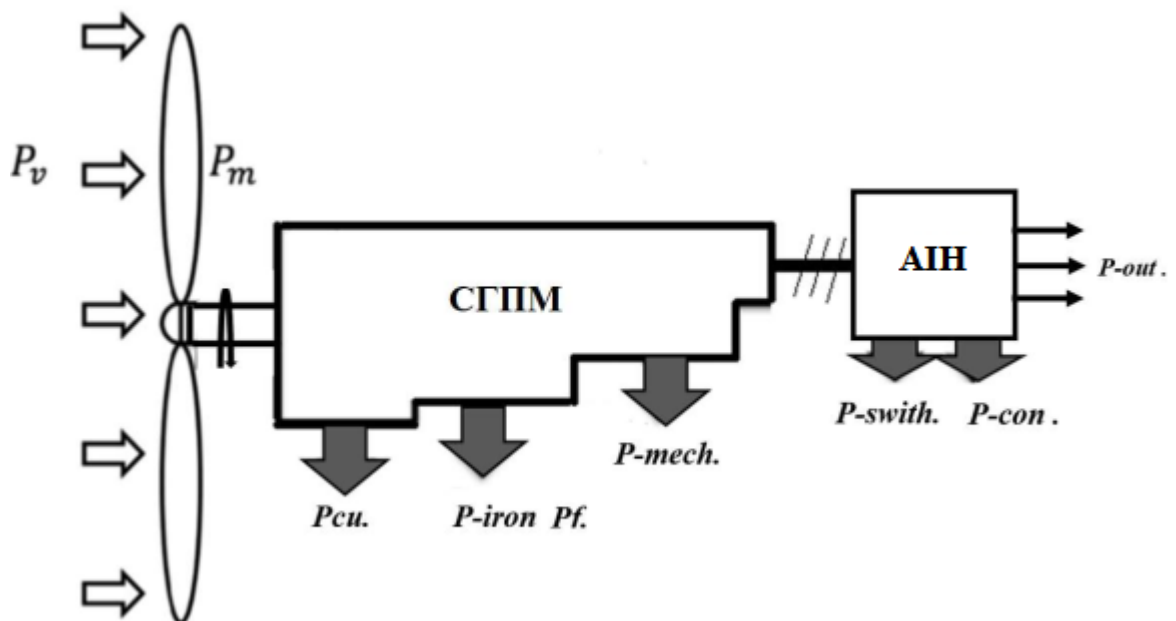


Рисунок 4.15 – Графіки фазних струмів БМПС у встановленому

P_{mech} – механічні втрати потужності в турбіні (обумовлені переважно межею Беца, а також втратами на тертя у підшипниках); P_{cu} – втрати в міді генератора; PF – втрати в сталі генератора; P_{conv} – комутаційні втрати у перетворювачі; $P_{out} = P_{el}$ – вихідна електрична потужність генератора.

Під впливом деякої ненульової швидкості вітру на лопатях турбіни виникає механічний момент M_{wt} , величина якого залежить від аеродинамічної характеристики турбіни $C_p(\lambda)$, $C_m(\lambda)$. Момент M_{wt} розкручує вал генератора, в обмотках якого починає наводитися проти-ЕРС. Водночас швидкохідність турбіни λ збільшується, відповідно момент на її лопатях M_{wt} зменшується доти, доки не буде досягнуто рівноваги з генераторним моментом БМПС M_{em} .

Приступаємо до імплементації математичної моделі БЕУ до Simulink. Підсистема, що описує аеродинаміку лопатей, зображено рисунку 4.16.

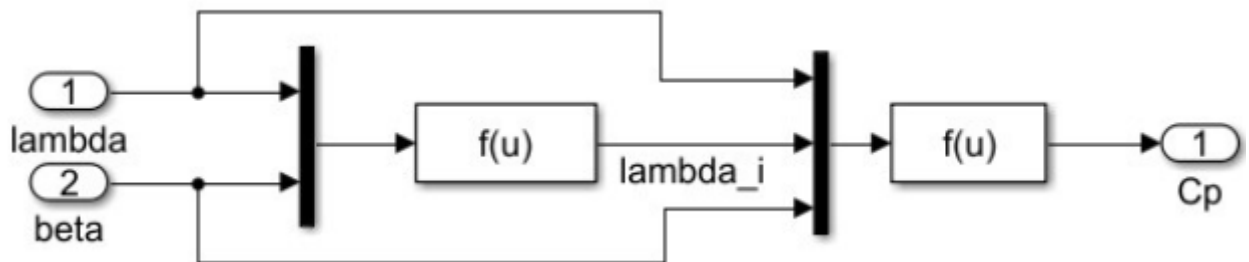


Рисунок 4.16 – Підсистема, що описує аеродинаміку лопатей турбіни

Аеродинамічна характеристика турбіни з вибраними аеродинамічними коефіцієнтами, отримана в результаті моделювання, зображено на рисунку 4.17.

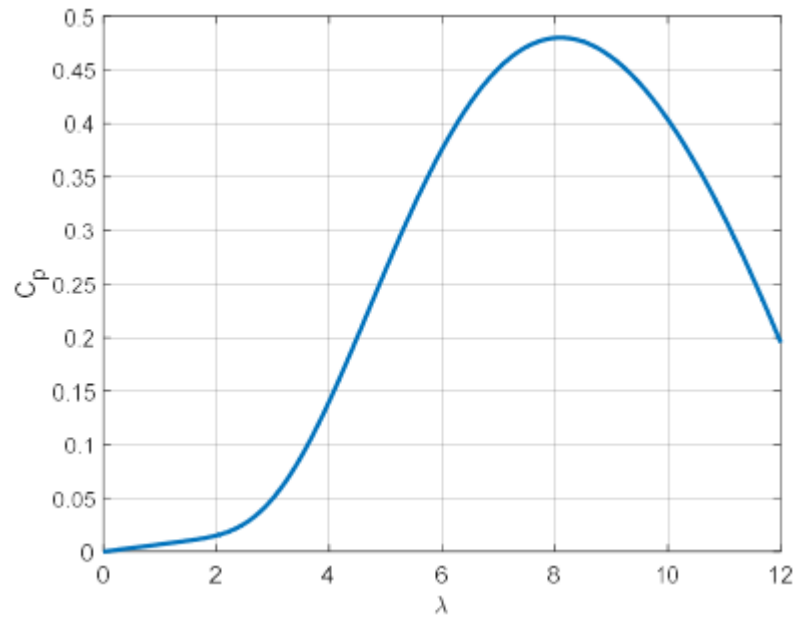


Рисунок 4.17 – Аеродинамічна характеристика трилопатевої турбіни з лопатями профілю NACA4415

Загальна модель ВЕУ з БМПС як генератор без системи автоматичного регулювання (САР) вихідної потужності генератора представлено на рисунку 4.18.

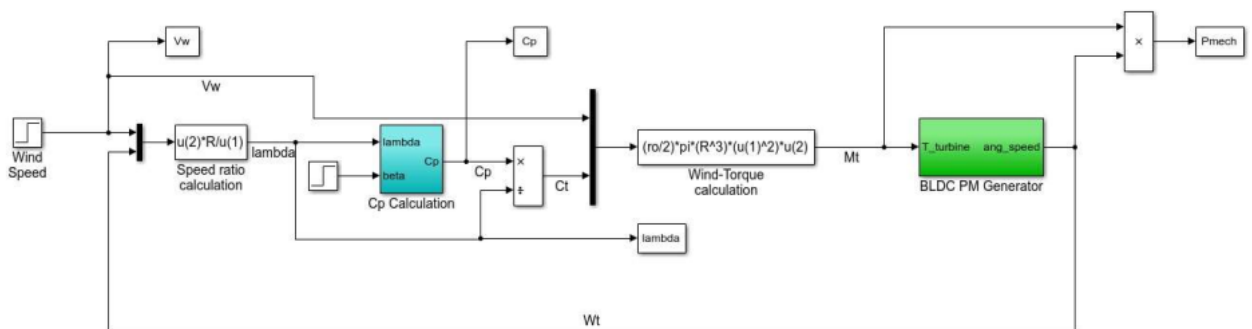


Рисунок 4.18 – Загальна модель ВЕУ із БМПС без САР вихідної потужності генератора

В якості збурюючого впливу будемо подавати на певну величину швидкості вітру. У початковий момент часу вона становить 5 м/с, а в момент часу 7с, скачком збільшується до 7 м/с. Графіки, що відображають результати моделювання, приведені на рисунках 4.19-4.21.

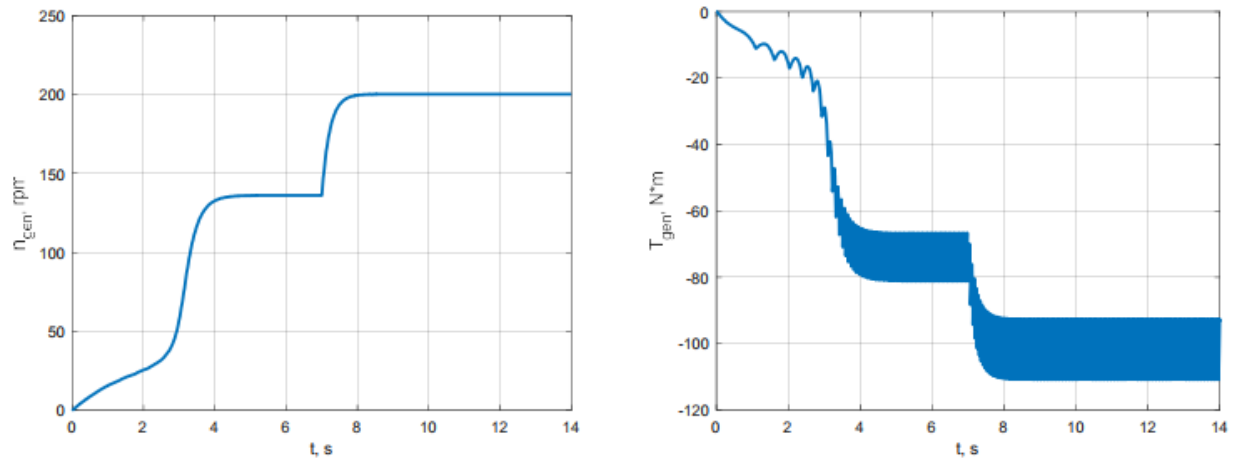


Рисунок 4.19 – Перехідні процеси по моменту та швидкості
обертання валу генератора

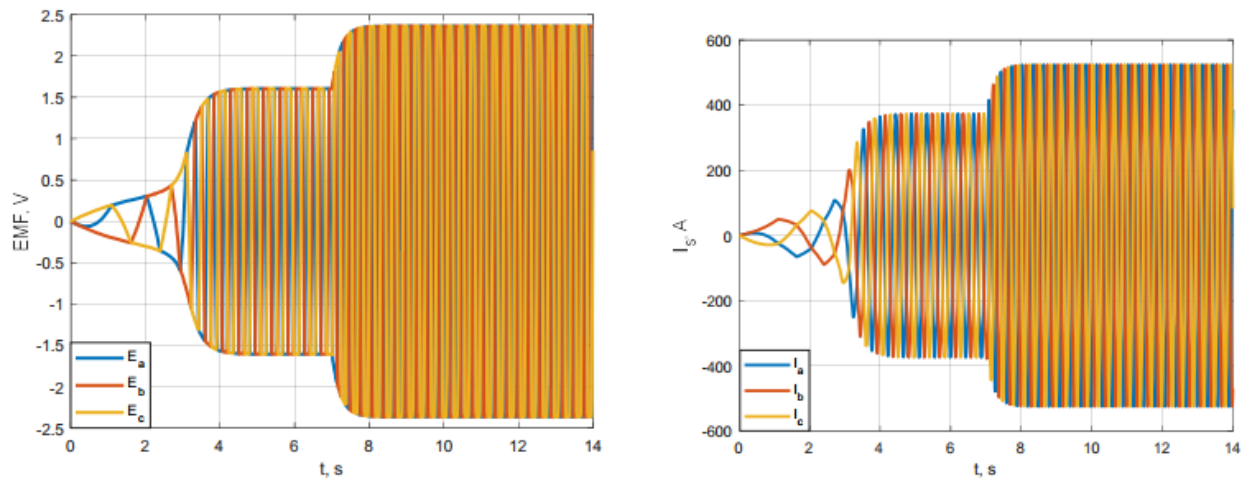


Рисунок 4.20 – Перехідні процеси по ЕРС та фазним струмам генератора

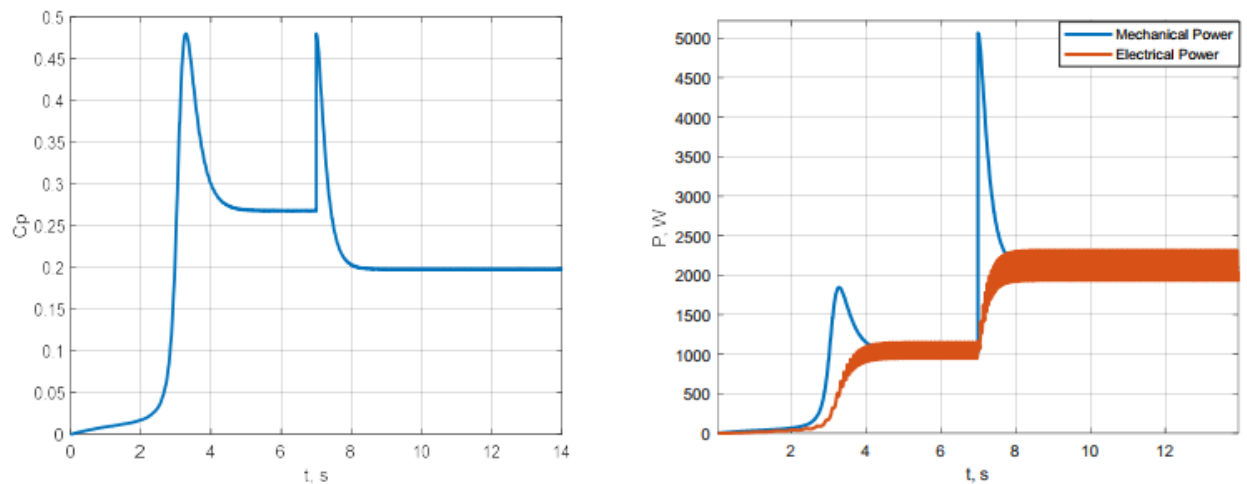


Рисунок 4.21 – Перехідні процеси по коефіцієнту використання енергії вітру
турбіни та механічні й потужності на її лопатях і вихідній
електричні потужності

4.6 Висновок

Розроблена математическая модель аэродинамики ветротурбины с горизонтальной осью.

Створена імітаційна модель вітроустановки в Simulink для різних значень швидкості вітру (4...16 м/с). Розглянуто вплив угла атаки лопастей на швидкохідність турбіни. Отримано залежність потужності ветротурбіни від її швидкості та визначено значення максимального коефіцієнта використання потужності турбіни.

Розроблено математичну модель аеродинаміки вітротурбіни з горизонтальною віссю. Складено імітаційну модель вітроустановки в Simulink для різних значень швидкості вітру (6-15 м/с).

5 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА БАЗІ БЕЗКОНТАКТНОЇ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

5.1 Характеристики системи керування ВЕУ на основі перетворювача частоти

Починаючи з середини минулого століття перетворювачі частоти (ПЧ) на основі мікропроцесорних та напівпровідникових технологій широко почали використовуватися в системі управління електроприводів різних потужностей для оптимального режиму роботи механізмів і виробничих обладнань [24, 28].

На сьогоднішній день частотні перетворювачі широко використовуються в системі управління електроприводами та включають в себе безліч спеціальних функцій, які забезпечують надійну роботу електромеханічних систем.

Одне з головних достоїнств сучасного ПЧ – це наявність в ньому вбудованого регулятора процесу типу ПІД. При подачі зворотного сигналу від датчика швидкості, який з'єднаний з керуючим валом електромеханічного об'єкта, ПЧ надійно регулює оптимальну швидкість обертання валу при заданих значеннях швидкості, струму та напруги із врахуванням зовнішніх збурень.

Тому ПІД-регулятор широко застосовують в системі управління для точного підтримки швидкості обертання валів електроприводів незалежно від різких змін навантаження на вихідних затискачах генераторів. Завдяки зворотному сигналу по швидкості ПЧ запобігає резонансним механічним скачкам на валах при режимі розгону, гальмування та прискорення. При розгоні, якщо задано занадто велике прискорення і недостатньо потужності для забезпечення розгону електроприводу, інвертор автоматично збільшує час розгону. У разі перевантаження замість аварійного відключення

електроприводу або механізмів ПЧ продовжує роботу, пропорційно зменшуючи швидкість обертального механізму, що забезпечує надійну роботу механізмів без зупинки при гальмуванні.

ПЧ продовжує час гальмування з урахуванням інерційних моментів крутного валу, що забезпечує плавне регулювання всієї системи.

Ще однією дуже важливою перевагою ПЧ є його інтелектуальне управління електричними параметрами. В цьому режимі система управління інвертором ПЧ автоматично відстежує струм споживання, параметри навантаження та амплітуду напруги на керованому електромеханічному об'єкті і в залежності від заданих значень струму, напруги та потужності пропорційно коригує їх для надійної роботи всієї керованої системи.

Класифікація напівпровідникових елементів, схеми управління ПЧ, де на вході подається джерело змінного струму і керований випрямляч 1 з сигнальним входом α , яким задається сигнал управління, керований випрямляч 2. Третя частина ПЧ складається з вузлів проміжного кола 3, 4 та 5, які одночасно виконують функцію фільтрації та управління вихідної напруги постійного струму випрямляча. Четверта частина складається з інвертора 6 з амплітудно-імпульсною модуляцією (АІМ) та 7 з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), яка формує змінний струм заданої частоти із синусоїдальною формою напруги.

Для схеми ПЧ з АІМ застосовують керований випрямляч 1, проміжне коло змінює постійний струм 5 і 7, а також інвертор з ШІМ. Таку схему можна реалізувати через три контури ПЧ за допомогою систем управління випрямлячів (СКВ), систем керування проміжною ланкою (СКПК) та систем керування інвертором (СКІ) для бажаного управління частоти та напруги електромеханічного об'єкта.

Оскільки схема генерування ВЕУ з МР є динамічною системою, то для управління нею використовуємо випрямляч з керуючим транзистором. У проміжну ланку між випрямлячем та інвертором вставимо керуючий транзистор для управління значенням постійної напруги. Також в схемі

інвертора вставимо керуючий транзистор для більш точного управління амплітудою вихідної напруги інвертора (рисунк 5.1).

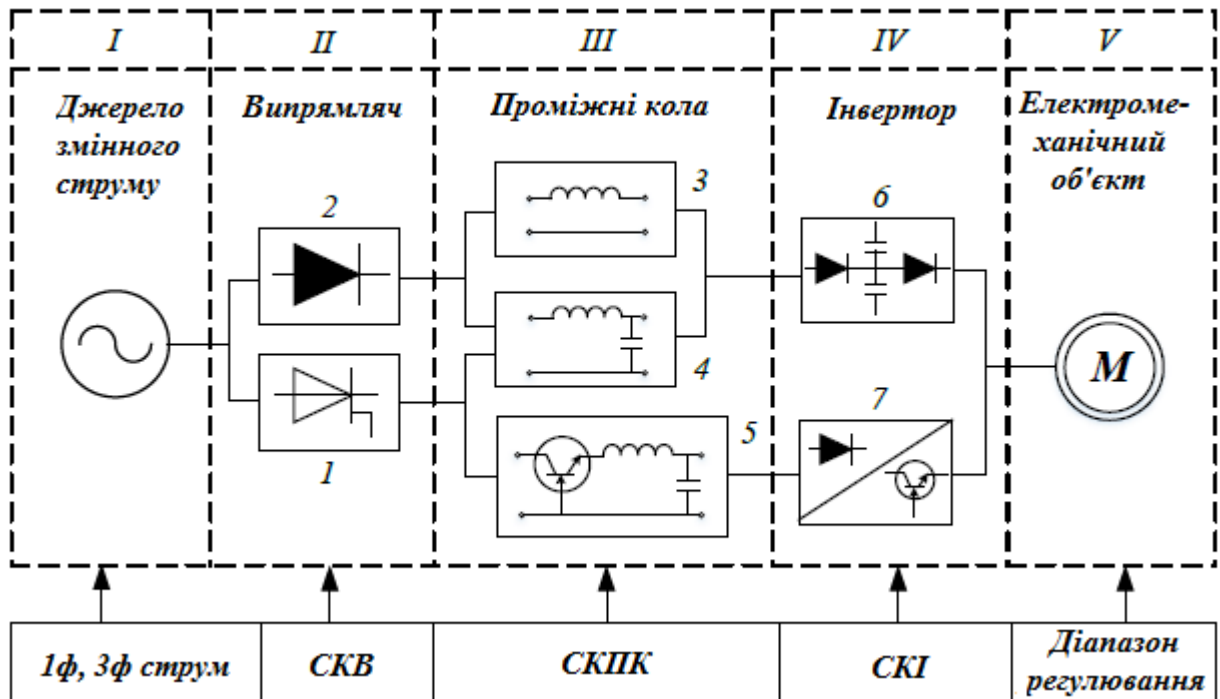


Рисунок 5.1 – Функціональне призначення вузлів схеми перетворювача частоти

На рисунку 5.1 приведені такі позначення: 1 – некерований випрямляч; 2 – керований випрямляч; 3, 4, 5 – напівпровідникові елементи проміжного кола; 6 – амплітудно-імпульсний модулятор; 7 – широтно-імпульсний модулятор.

Випрямляч напруги – перший елемент, який безпосередньо підключається до трифазної або однофазної мережі змінного струму з фіксованою частотою (в більшості випадків 50 Гц). Основними елементами випрямлячів ПЧ є напівпровідникові елементи з некерованими діодами і керованими тиристорами. У керованих випрямлячах діод замінюють на тиристор з трьома електродами анод, катод і керованим сигналом для відкриття і закривання затвора. Завдяки керованому затвору можна змінити величину випрямленої напруги шляхом подачі сигналу на вхід

затвора. Проміжною ланкою в системі ПЧ є фільтр для згладжування постійної напруги на виході випрямляча. В керованих проміжних колах передбачений транзистор, який управляється за допомогою зовнішнього сигналу для переривання постійної напруги в проміжному колі. Котушка індуктивності та конденсатор підтримують напругу при різних частотах комутації транзистора і тим самим ефективно управляють значенням постійної напруги в цьому колі. Крім того, в проміжному колі в схемі генерування ВЕУ встановлена акумуляторна батарея для акумулювання надлишкового струму. Інвертор – останній контур (ланка) в ПЧ, який формує потрібне значення змінної напруги для управління електромеханічним об'єктом (в основному електричні машини). Для отримання більш точної форми синусоїдального струму на виході інвертора ПЧ встановлюють RLC-фільтри. Приклад формування напруг в різних вузлах перетворювача частоти приведений на рисунку 5.2.

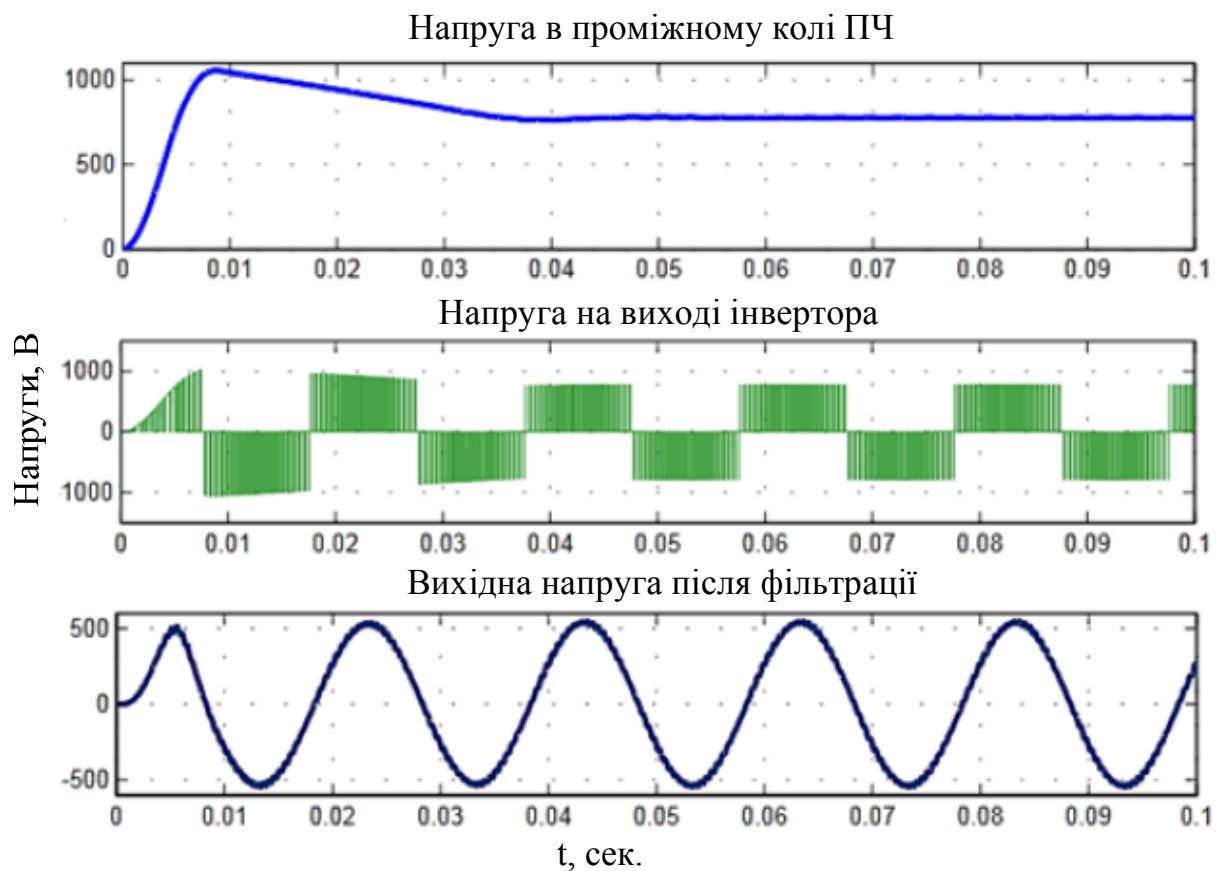


Рисунок 5.2 – Осцилограми напруг контурів ПЧ

На виході інвертора напруги після фільтрації форма напруги синусоїдальна. Керуючи зворотним зв'язком ПЧ в залежності від електромеханічних параметрів електромеханічного об'єкта, можна отримати на виході ПЧ необхідну форму напруги та частоти для управління магнітною індукцією статора електромеханічного об'єкта.

Застосування ПЧ в якості регулюючого пристрою в системі генерування ВЕУ забезпечує надійне управління електромеханічного об'єкта у всіх діапазонах швидкості обертання валів та механізмів шляхом пропорційної адаптації вихідної напруги інвертора в залежності від навантаження доданих до валу електромеханічних об'єктів ВЕУ.

Завдяки системі управління ПЧ зі зворотним зв'язком по струму та напрузі, на статорі електромеханічного об'єкта ВЕУ виникає стабільне магнітне поле і в повітряних зазорах, що забезпечує надійне управління із врахуванням навантаження, прикладеного до ВГ.

5.2 Система генерування електроенергії ВЕУ з випрямно-інверторним перетворювачем

При нерівномірному обертанні вітроколеса в залежності від змінної градації швидкості вітру на вихідних затискачах ВГ напруга і струм хаотично змінюються. Крім того, при різних частотах магнітного поля статора за рахунок різниці швидкості обертання ротора форма струму та напруги на виході ВГ стає несинусоїдальною. Стабілізація величини напруги і струму в системі генерування електричної енергії в ВЕУ здійснюється із застосуванням випрямляча для зміни вихідних значень напруги та струму на затискачах ВГ та інверторного перетворювача для перетворення постійної напруги випрямляча в змінну зі стандартним значенням вихідної напруги, форма якої близька до синусоїдальної. Схема генерування ВЕУ з універсальним контролером з випрямно-інверторним перетворювачем напруги приведена на рисунку 5.3. Схема містить три основних

перетворювальних елементів: випрямляч, акумулятор, інвертор та один керуючий контролер.

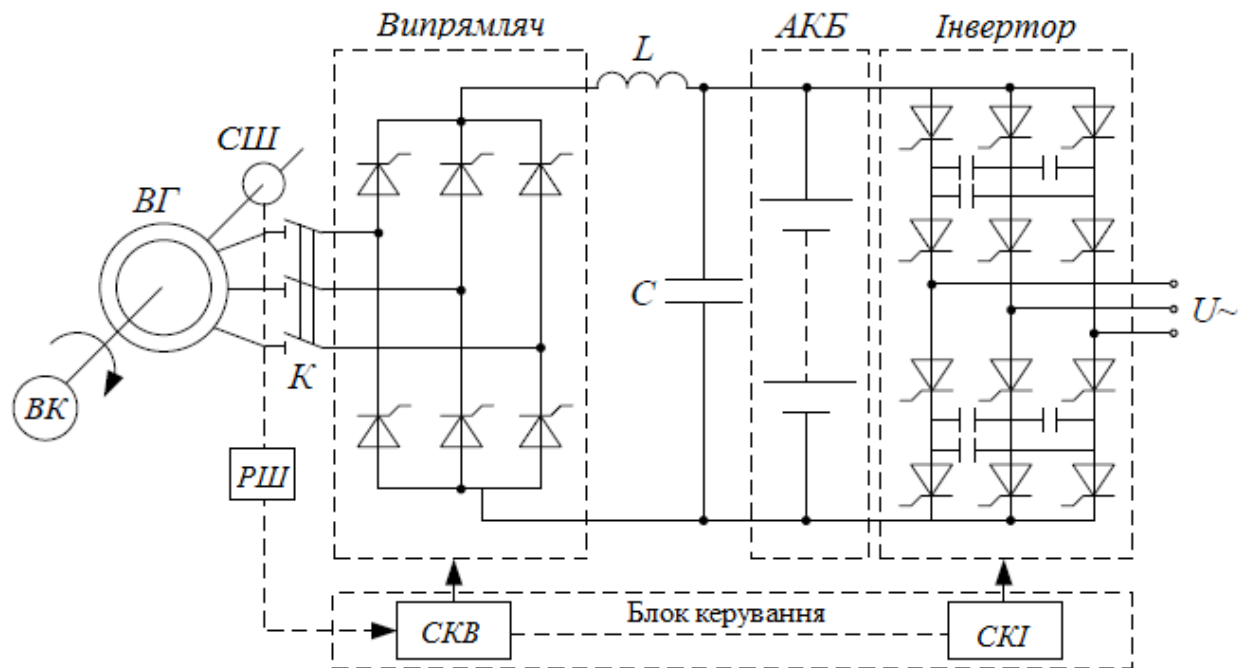


Рисунок 5.3 – Схема генерування ВЕУ на основі випрямляча та інвертора

На рисунку 5.3 приведені такі позначення: ВК – вітроколесо; ВГ – вітрогенератор; СШ – сенсор швидкості; РШ – регулятор швидкості; LC – фільтр; АКБ – акумуляторна батарея; СКВ – система керування випрямлячем; СКІ – система керування інвертором.

Випрямляч на основі керованих діодів перетворює напругу електричного генератора вітроенергетичної установки в постійну для зарядки акумуляторної батареї (АКБ). Між випрямлячем та АКБ встановлені LC-елементи для фільтрації вихідної постійної напруги випрямляча.

Після перетворення змінної напруги ВГ випрямлячем, керуючий інвертор на основі тиристорних елементів перетворює постійну напругу в змінну напругу стандартної частоти (див. рисунок 5.4).

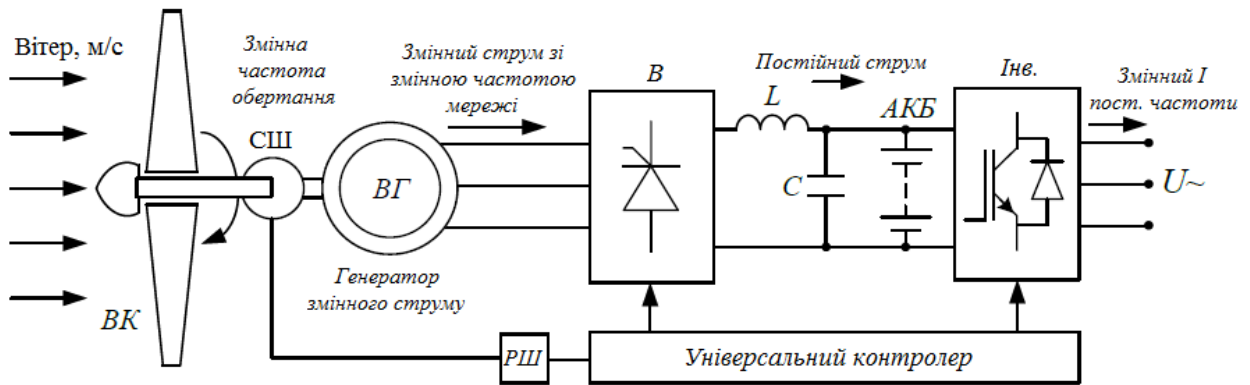


Рисунок 5.4 – Структурна схема генерування ВЕУ на основі випрямляча та інвертора

Амплітуда та частота вихідної напруги на затискачах інверторного перетворювача залежать від частоти перемикання тиристорів. Ця обставина ставить завдання більш точного вибору сенсора швидкості на валах ВГ для більш точного перемикання тиристорів в залежності від заданого рівня та частоти вихідної напруги на виході інвертора.

Важливим проміжним вузлом системи перетворення з постійного в змінний струм є фільтри. Фільтри виконують функцію згладжування пульсації випрямленої напруги або струму для рівномірного розподілу гармонік струму в кутовому просторі.

5.3 Система векторного керування ВЕУ

Схема векторного керування працює в режимі підтримки максимуму потужності підвищення ККД вітрогенератора, забезпечуючи оптимальну швидкість обертання турбіни. При цьому швидкість обертання турбіни, необхідна для підтримки в системі оптимального значення швидкохідності, що забезпечує максимум потужності, розраховується для конкретного значення швидкості вітру.

Для реалізації цього методу управління швидкохідністю необхідно мати інформацію про оптимальне значення швидкохідності турбіни λ_{opt} , значення швидкості вітру v_w .

Регулювання швидкості обертання вітротурбіни забезпечується за допомогою векторної системи управління генератором, змінюючи момент на валу генератора за рахунок обчислення оптимального значення електричної навантаження.

Схема управління СДПМ з використанням методу векторного управління показано на рисунку 5.5.

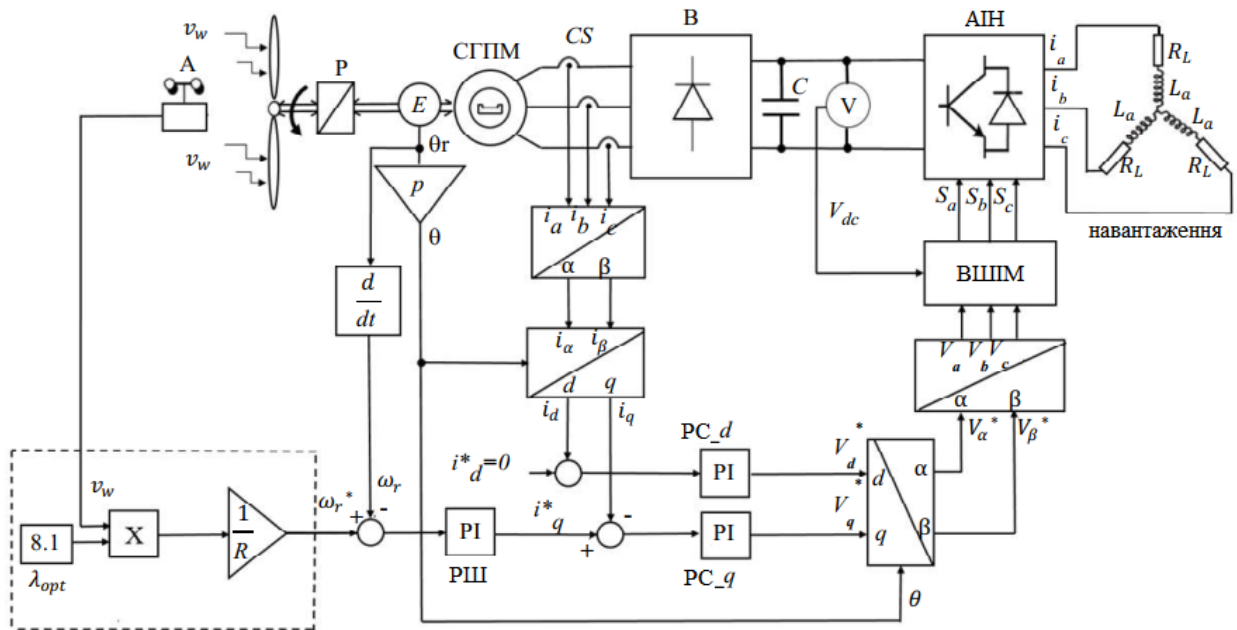


Рисунок 5.5 – Структурна схема системи векторного управління СДПМ

На рисунку 5.5 використані такі позначення: А – анемометр; Р – редуктор; Е – енкодер; CS – сенсори струму; В – випрямляч; АІН – автономний інвертор напруги; ВШПМ – блок векторної ШІМ; РШ – регулятор швидкості.

Дана схема реалізована за допомогою середовища візуального моделювання динамічних систем Simulink. Режим підтримки максимуму потужності представлений для передбачуваних значень швидкості вітру та передавального числа редуктора $i = 3$.

6 АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗОВАНОЇ РОБОТИ ВЕУ

Алгоритм автоматизованої роботи ВЕУ (див. рисунок 6.1) працює наступним чином.

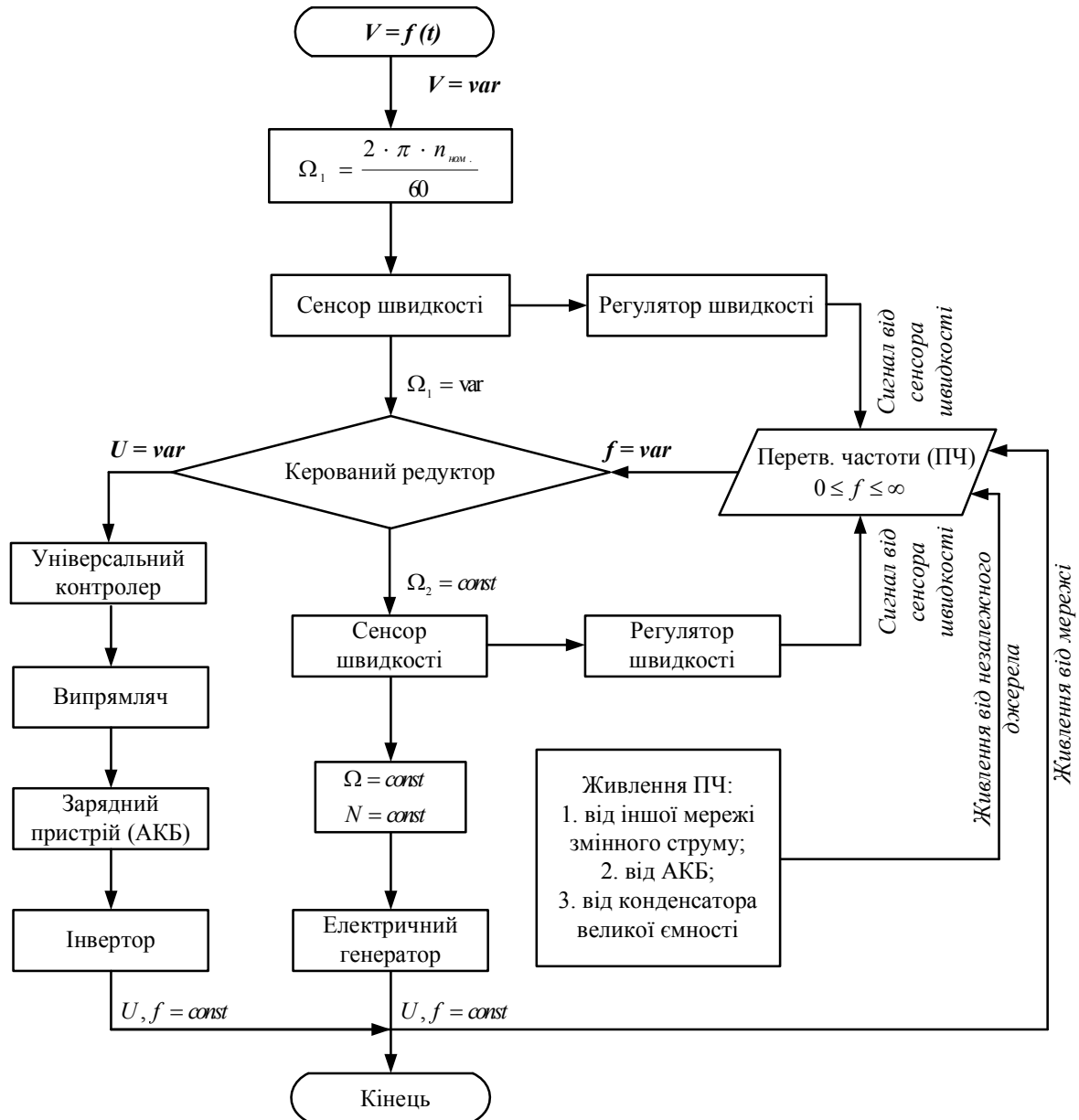


Рисунок 7.1 – Алгоритм автоматизованої роботи ВЕУ з МР

Змінна швидкість вітру діє на лопаті, які з'єднані з вхідним валом редуктора і мають кутову швидкість Ω_1 . Сенсор швидкості, який розташований на тихохідному валу, формує сигнал в залежності від швидкості обертання ВК і надходить на РШ. Регулятор швидкості на основі

підсилювачів ПД видає сигнал на ПЧ для зміни величини кутової частоти магнітного поля статора. В алгоритмі враховані два сигнали сенсора швидкості: перший на тихохідному і другий на швидкохідному валах.

Перший сенсор формує сигнал в залежності від швидкості вітру, а другий – в залежності від навантаження, прикладеного до валу ВГ. Залежно від сигналів РШ ПЧ коригує частоту живлення магнітного поля статора в діапазоні $0 \leq f \leq \infty$. При регулюванні частоти статора вихідний вал обертається з постійною частотою, тобто $n_{ном} = const$, $\omega_{ном} = const$. Надлишкова потужність обмотки статора МР при збільшенні швидкості вітру рекуперується і надходить в універсальний контролер (УК). На виході УК встановлено випрямляч для перетворення змінного струму в постійний для зарядки акумуляторів.

Інвертор перетворює постійний струм акумулятора в змінний для віддачі надлишкової потужності в мережу.

Запропонований алгоритм автоматизованої роботи ВЕУ дозволяє максимально використовувати енергію вітру за рахунок рекуперації надлишків потужності, в разі збільшення швидкості вітру, і при цьому максимально використовується енергія вітру.

Висновок:

Алгоритм автоматизованої роботи та регулювання електромеханічних частин ВЕУ включає в себе наступні основні функції:

1. Виявлення необхідного рівня швидкості в межах діапазону регулювання із врахуванням мінімуму та максимуму значень струму і напруги.
2. Підтримка встановленого значення швидкості із врахуванням зовнішніх впливів та при мінливому значенні потужності на затисках ВГ.
3. Автоматичне усунення впливу внутрішніх значень, тобто вплив основних інерційних моментів на підсумок регулювання вихідних електричних параметрів ВГ.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ

В магістерській випусковій роботі досліджуються заходи з підвищення ефективності функціональної системи вітрової генераторної установки з магнітним редуктором. Монтаж та технічне обслуговування вітрової генераторної установки здійснюється в спеціальному приміщенні.

Згідно ГОСТ 12.0.003-74, на оперативно-ремонтний персонал, який здійснює технічне обслуговування та експлуатацію обладнання вітрової генераторної установки, впливають наступні шкідливі та небезпечні фактори:

а) фізичні:

- підвищена температура повітря робочої зони;
- підвищена та знижена вологість повітря;
- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- недостатність природного освітлення;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутись через тіло людини;
- підвищений рівень вібрації,

б) хімічні:

- загальнотоксичні (озон);
- через органи дихання;

в) психофізіологічні:

- фізичні перевантаження (динамічні)
- нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, перенапруга аналізаторів).

До оперативного обслуговування електроустановками допускаються працівники, які знають їхні схеми, інструкції з експлуатації, особливості конструкції та роботи обладнання і пройшли навчання та перевірку знань.

Незалежно від рівня автоматизації людина залишається головною ланкою в системі людина - машина (СЛМ). Саме вона ставить мету перед системою, планує, направляє і контролює увесь процес. Тому діяльність оператора є вихідним пунктом інженерно-психологічного аналізу і вивчення СЛМ. Діяльність оператора має ряд особливостей, які визначаються різноманітними тенденціями розвитку сучасного виробництва.

З розвитком техніки збільшується число об'єктів, якими необхідно керувати. Це ускладнює і підвищує роль операцій планування і організації праці, контролю та управління виробничими процесами.

7.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

7.1.1 Обладнання робочого місця

Загальна площа приміщення, де здійснюється монтаж та технічне обслуговування вітрогенераторів, складає 294 м². В ньому розміщені робочі місця персоналу та виробниче обладнання. Висота приміщення складає 6 м. Приміщення освітлюється за допомогою штучного освітлення [23]. План приміщення для діагностики вітрогенераторів з двигунами постійного струму малої потужності представлений на рисунку 7.1.

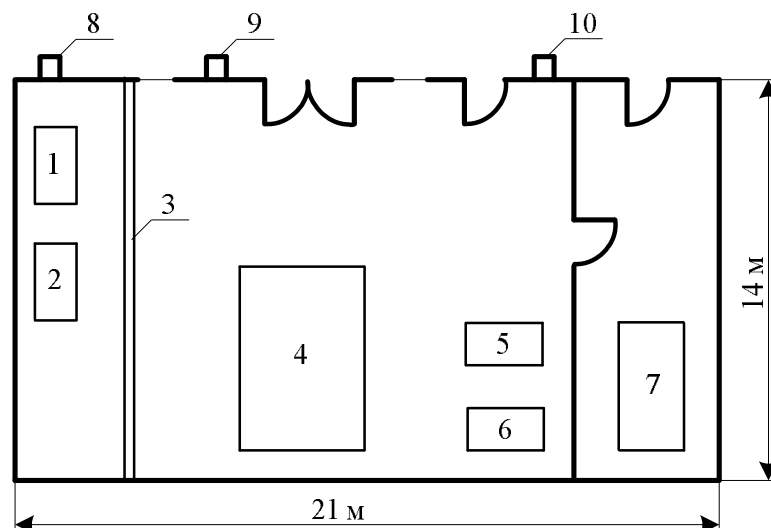


Рисунок 7.1 – План приміщення для діагностики вітрогенераторів з двигунами постійного струму малої потужності

На рисунку 7.1 прийняті наступні позначення: 1,2,7 – верстати; 3 – кран-балка; 4 – установка для діагностики вітрогенераторів з магнітним редуктором; 5, 6 – робочі місця електромонтажників; 8,9,10 – витяжна вентиляція.

7.1.2 Електробезпека

Живлення обладнання та системи освітлення здійснюється від чотирьох провідної трифазної мережі з глухозаземленою нейтраллю 380 х 220В (фазна напруга фаза (фаза – «0») – 220В, а між фазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

У приміщенні де здійснюється діагностика вітрогенераторів з двигунами постійного струму малої потужності використовується трифазна чотирипровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Відповідно з ГОСТ 12.1.013-78 умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у робочих приміщеннях є струмопровідною.

Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003-74, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення.

Згідно із ГОСТ 12.1.030-81, в якості захисту від ураження людей електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ - спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

Струмоведачі частини напругою до 1 кВ у місцях, де працюють люди, висота розміщення повинна бути не менше 3,5 м. Постійний контроль за ізоляцією, тому що протягом часу відбувається старіння ізоляції, що може привести до пробоя і створити небезпеку при дотику людини до ізольованих проводів. Використовують наступні кольори для маркування ізоляції: чорна - для силових ланцюгів; червона - для ланцюгів керування.

В процесі експлуатації слід постійно контролювати стан контактних сполучень та ізоляції апаратури, відсутність слідів дуги та оплавлення ошиновування, опір ізоляції силових та освітлювальних мереж, правильність підключення. На всіх підготовлених місцях роботи після накладається заземлення вивіщується плакат "Працювати тут".

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1. Для запобігання електротравм від контакту зі 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 здійснюється у закритих конструкціях підлоги.

2. При живленні однофазних споживачів струму від три провідної мережі при напрузі до 1000В використовується нульовий захисний провідник. За умови його використання, пробій на корпус призводить до короткого замикання. В свою чергу спрацьовує захист і пошкоджений споживач відключається від мережі.

3. Електрозахисні засоби захисту.

Оператор силової підйомної установки повинен дотримуватись наступних основних правил техніки безпеки:

1. Необхідно візуально обстежити установку у відповідності з інструкцією по експлуатації і переконатися в її повній справності;

2. Забороняється експлуатація установок з несправним керуванням, гальмами і звуко/світловими сигналами. Якщо немає можливості усунення пошкодження на місці своїми силами, необхідно залучити до робіт фахівців спеціалізованої організації.

3. Забороняється керування установкою вологими або замасленими руками;

4. Забороняється збільшувати вантажопідйомність установки;

5. Рух установки повинен здійснюватися на безпечній швидкості;

6. Роботи по монтажу і модернізації системи керування проводяться за допомогою справного інструменту.

Для забезпечення безпечного ведення робіт обслуговуючий персонал зобов'язаний суворо дотримуватись правил техніки безпеки при експлуатації, технічному обслуговуванні установок. Недотримання правил техніки безпеки може призвести до отримання травм та втрати працездатності.

Всі обертові частини механізму повинні мати добре закріплену огорожу. Забороняється виконувати всі види ремонту під час роботи установки.

Під час роботи, пов'язаної з дотиком до струмопровідних частин електродвигуна, що обертаються, і механізму, який вони приводять в рух, необхідно зупинити двигун і на його пусковому пристрої або ключі керування, якщо можливе обертання електродвигунів від з'єднаних з ним механізмів, слід зачинити і замкнути на замок засуви і шибери цих механізмів, а також вивісити плакат «Не вмикати! Працюють люди».

7.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

7.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат приміщення - це сукупність фізичних параметрів повітря в виробничому приміщенні, які діють на людину в процесі праці на її робочому місці, в робочій зоні.

Параметри мікроклімату характеризуються такими показниками: температурою повітря і відотною вологістю повітря, швидкістю його переміщення, потужністю теплових випромінювань. При цьому слід розрізняти оптимальні та допустимі мікрокліматичні умови.

Допустимі мікрокліматичні умови - поєднання кількісних показників мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливові на людину можуть викликати скороминучі зміни, що швидко нормалізують тепловий стан організму, і які супроводжуються напруженням механізмів терморегуляції, не виходячи за межі фізіологічних пристосувальних можливостей. При цьому виникає пошкодження або порушення стану здоров'я, але можуть спостерігатися дискомфортні тепловідчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності.

Допустимі величини показників мікроклімату встановлюють тоді, коли за технологічними умовами, технічними і економічними причинами не забезпечуються оптимальні норми.

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Робота оператора силової установки відноситься до легкої фізичної роботи категорія Іа, бо людина-оператор практично весь свій робочий день проводить сидячи. Параметри мікроклімату в кабіні крану наведено в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Нормування параметрів мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура °C	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Іб	21-28	55 при 27°C	0,1-0,3
Холодний	Іб	20-24	75	Не більше 0,2

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату

на робочому місці оператора крану передбачається:

- в холодну пору року - використання калорифера;
- в літню пору - застосування кондиціонерів та вентиляторів обдуву.

7.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин

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

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено:

Провітрювання кабіни оператора;

Цілісність конструкції кабіни та вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення кабіни під час роботи установки;

Встановлення пиловловлюючих засобів.

7.2.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення

В залежності від джерела світла промислове освітлення поділяється на: природне освітлення – освітленість приміщень світлом неба (прямого або відображеного), яке проникає в приміщення через світлові пройми в зовнішніх огорожуючих конструкціях. По своєму спектральному складу воно є найбільш сприятливим. Природне та суміщене освітлення характеризується коефіцієнтом природної освітленості КПО (e_n). КПО –

відношення природного освітлення, яке створюється в деякій точці заданої площини всередині приміщення світлом неба, до значення зовнішньої горизонтальної освітленості.

Ті місця, що освітлюється тільки бічним світлом, нормується мінімальне значення КЕО в межах робочої зони, що повинно бути забезпечене в точках, найбільше віддалених від вікна.

Штучне освітлення.

Штучне освітлення використовується двох систем: загальне або комбіноване. Загальне освітлення – освітлення, при якому світильники розміщуються у верхній зоні приміщення рівномірно або пристосовуються до розташування обладнання. Комбіноване освітлення – це додаткове освітлення, при якому до загального освітлення додається ще й місцеве. Місьцеве освітлення – освітлення, яке створюється світильниками, що концентрують світловий потік безпосередньо на робочих місцях.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018, роботи з влаштування звукоізоляції внутрішніх стін, потребують освітлення, яке характеризується розрядом зорової роботи III, підрозряд «в».

Нормовані значення штучного, природного та суміщеного освітлення наведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – 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 0,3 до 0,5 включно	III	в	малий середній великий	світлий середній темний	600	200	-	3,0

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.

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.

7.2.4. Виробничий шум

Рівень звуку вимірюється в децибелах і визначається по формулі:

$$L = 20 \lg \left(\frac{P}{P_0} \right) = 20 \lg \left(\frac{U}{U_0} \right), \quad (7.2)$$

де L – рівень шуму, дБ;

P – звуковий тиск, Па;

U_0 – коливальна швидкість, $5 \cdot 10^{-8}$ м/с;

P_0 – нульове значення звукового тиску на нижньому порозі чутності в октавній смузі зі середньгеометричною частотою 1000 Гц, умовно прийняте рівним $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

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 (таблиця 7.5), є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки».

Таблиця 7.5 – Рівень звукового тиску

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

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.

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.

7.2.5 Виробничі вібрації

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 приміщенні, де розташований шахтний підйомник, присутня вібрація типу – загальна. Тобто технологічна вібрація діюча на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання.

Основні параметри вібрації приведені у таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Середньоквадратичні значення параметрів вібрації

Категорія вібрації по санітарним нормам	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	дБ	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 10^{-2}$	дБ
Загальна	Z_0, Y_0, X_0	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.

7.2.6 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 позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаємного розташування різних частин тіла відносно одна одної) до 25% часу зміни. Знаходження в позі стоячи до 60% часу зміни.

Сумарна маса вантажів, що переміщуються протягом кожної години зміни: з робочої поверхні (чоловіки): до 870

Нахили корпусу (вимушені, більше 30), кількість за зміну: 51 – 100

Переміщення у просторі (переходи, обумовлені технологічним процесом протягом зміни), км

По горизонталі: до 8

По вертикалі: до 4

Інтелектуальні навантаження: Рішення простих альтернативних завдань згідно з інструкцією

Зміст роботи: Сприймання сигналів з наступною корекцією дій та операцій, Обробка, виконання завдання та його перевірка, Робота за встановленим графіком з можливим його коректуванням у ході діяльності

Сенсорні навантаження:

Тривалість зосередженого спостереження (в % від часу зміни) 25-50

Щільність сигналів (світлових, звукових) та повідомлень в середньому за годину роботи 75-175

Кількість виробничих об'єктів одночасного спостереження 5- 10

Навантаження на зоровий аналізатор (Спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) 2-3

Навантаження на слуховий аналізатор (при виробничій необхідності сприйняття мови чи диференційованих сигналів) Розбірливість слів та сигналів від 90% до 70%

Навантаження на голосовий апарат (сумарна кількість годин, що наговорюються протягом тижня) 16-20

Емоційне навантаження:

Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності. Значущість помилки – Несе відповідальність за функціональну якість допоміжних робіт (завдань). Вимагає додаткових зусиль з боку керівництва (бригадира, майстра 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 10-6

Тривалість виконання простих виробничих завдань чи операцій, що повторюються (сек.) 100-25

Монотонність виробничої обстановки (час пасивного спостереження за технологічним процесом в % від часу зміни) 76-90

Режим праці

Фактична тривалість робочого дня (год.) 8 – 9

Змінність роботи Двозмінна робота (без нічної зміни)

Наявність регламентованих перерв та їх тривалість Перерви регламентовані, недостатньої тривалості: від 3% до 7% часу зміни.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Автономний перетворювач вітроенергетичної установки на базі безконтактної електричної машини» були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності функціонування частотного електропривода та отримано такі результати досліджень:

1. Аналіз схем генерування ВЕУ показав, що всі схеми розроблені з урахуванням характеристики споживачів і немає ніяких універсальних схем генерування енергії, що дозволило б застосувати їх у всіх об'єктах електропостачання, незалежно від роду струму та напруги. Крім того, схеми генерування ВЕУ є складними і з точки зору економічних показників не завжди рентабельні.

Для генерування енергії вітру необхідно розглянути та змоделювати комплекс технічних засобів з метою раціонального використання потужності потоку вітру, оскільки градація швидкості вітру є випадковою величиною і діапазон регулювання швидкості ВК є важливим фактором для вибору основного обладнання та систем регулювання

2. Запропоновані математичні та комп'ютерні моделі вітротурбіни малої потужності горизонтальною віссю, безконтактної машини постійного струму, моделювання аеродинаміки вітротурбіни в Simulink та математична модель БМПС в Simulink. Розроблено математичну модель аеродинаміки вітротурбіни з горизонтальною віссю. Складено імітаційну модель вітроустановки в Simulink для різних значень швидкості вітру (6-15 м/с).

3. Створена імітаційна модель вітроустановки в Simulink для різних значень швидкості вітру (4...16 м/с). Розглянуто вплив вугла атаки лопастей на швидкохідність турбіни. Отримано залежність потужності ветротурбіни від її швидкості та визначено значення максимального коефіцієнта використання потужності турбіни.

4. Запропоновані схема векторного керування ВЕУ працює в режимі підтримки максимуму потужності підвищення ККД вітротурбіни,

забезпечуючи оптимальну швидкість обертання турбіни. При цьому швидкість обертання турбіни, необхідна для підтримки в системі оптимального значення швидкохідності, що забезпечує максимум потужності, розраховується для конкретного значення швидкості вітру.

5. Алгоритм автоматизованої роботи і регулювання електромеханічних частин ВЕУ дозволяє максимально використовувати потужність вітру при його різкому збільшенні.

6. Виконано розрахунок ефективності капіталовкладень для впровадження електротехнічного комплексу на основі ВЕУ.

7. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації ВЕУ в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. – К.: ТОВ «ВіолаПрінт», 2008. – 55 с.
2. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
3. Chapin D. M., Fuller C. S., Pearson G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power // Journal of Applied Physics. – 1954. – Т. 25, №. 5. – P. 676–677
4. Ginley D. S. Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability / D. S. Ginley, D. Cahen (ed.). – Cambridge university press, 2011. – 754 p.
5. Wei C. Y. Efficiency improvement of HIT solar cells on p-type Si wafers / C.Y. Wei et al. // Materials. – 2013. – Vol. 6, №. 11. – P. 5440–5446.
6. Ivanov, O.B., Shkrabets, F.P., Zawilak, Jan. (2011). "Electrical generators driven by renewable energy systems", Wroclaw University of Technology, Wroclaw – 169 p.
7. Бабак В.П., Білецький А.Я., Гуржій А.М. Сигнали і спектри. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 492 с
8. Електроніка і мікросхемотехніка : Підручник для вищ. навч. закл. освіти : У 4-х т./ В.І. Сенько, М.В. Панасенко , Є.В. Сенько та ін.; Під ред. В.І. Сенька. – К.: ТВО "Видавництво Обереги", 2000. – Т.1. Елементна база електронних пристроїв. – 309 с.
9. Михальський В.М., Соколов В.М., Чехет Е.М. Векторна широтноімпульсна модуляція в матричних перетворювачах. Навчальний посібник. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2003. – 74с.
10. Сосков А. Г. Промислова електроніка : підручник / А. Г. Сосков, Ю. П. Колонтаєвський ; за ред. А. Г. Соскова. – Київ : Каравела, 2015. – 536 с.

11. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с.

12. Wind Power For Dummies (2009). [Published by Wiley Publishing], Inc. Indianapolis. – 387 p.

13. Тугай Д. В. Моделювання режимів роботи сонячної електростанції в SMART GRID системі електропостачання / Д. В. Тугай, Ю. П. Колонтаєвський, С. В. Котелевець, Е. С. Савчук // : Актуальні проблеми світлотехніки : матеріали VI міжнар. наук.-техн. конф. – Харків, 4–6 жовтня 2017 р. / Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – С. 132–133.

14. Сонячна батарея JA Solar JAP6-270 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ecoenerhiia.ua/sonjachni-batarei/sonjachna-batareja-ja-solar-jap6-270-poly.html>.

15. Roberts, P. Performance of Rotors in a Brushless Doubly-Fed Induction Machine (BDFM) [Электронный ресурс] / P. C. Roberts, R. A. McMahon, P.J. Tavner, J. M. Maciejowski, T. J. Flack, X. Wang // International Conference of Electrical Machines, 2004, Cracow, Poland. URL : <http://www.ime.pw.edu.pl/zme/pryw/bienpdf/dfim2.pdf>

16. Chinchilla M. Control of permanent-magnet generators applied to variable speed wind-energy systems connected to the grid / M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. C. Burgos // IEEE Transactions on energy conversion. – 2006. – Т. 21. – №. 1. – С. 130- 135.

17. Лежнюк П. Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2015. - № 2. - С. 134-145. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2015_2_28.

18. Лежнюк П.Д. Оперативне діагностування високовольтного обладнання в задачах оптимального керування режимами

електроенергетичних систем / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, О.В. Нікіторович // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 35–36.

19. Будівництво промислових СЕС [Електронний ресурс] / Інжинірингова компанія – Нові енергетичні технології. – Режим доступу : <http://iknet.com.ua/uk/presentation/full/ses>

20. 31. Atallah K. Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear / K. Atallah, S. D. Calverley, D. Howe. // IEE Proceedings-Electric Power Applications. – 2004. – Т. 151. – №. 2. – С. 135-143.

21. Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й. Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Моделювання електромеханічних систем. – Кременчук, 2001. – 376 с.

22. Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2022)», Вінниця, 2022. [Електронний ресурс]. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 3 с.

23. Демов О. Д., Бірюков О. О., Мельничук Л. М., Демов А. Д., Бірюков А. А., Мельничук Л. М., Demov O. D., Biryukov A. A., Melnychuk L. M.. Розрахунок собівартості електроенергії на промисловому підприємстві. Демов О. Д. Розрахунок собівартості електроенергії на промисловому підприємстві [Текст] : навчальний посібник / О. Д. Демов, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 92 с.

24. Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки щодо опрацювання розділу охорона праці в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей. – Вінниця 2003. –46 с.

25. НПАОП 40.1-1.32-01.(ДНАОП 0.00-1.32-01).Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.[Чинний від 2002-01-01].URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01>.

26. ДСТУБ В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01].Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

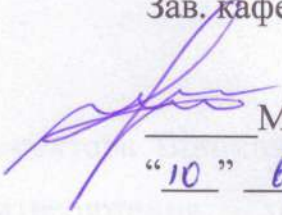
Додаток А

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

К.Т.Н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

«10» вересня 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

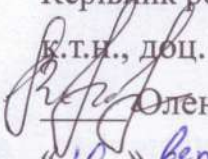
на магістерську кваліфікаційну роботу

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ ЗІ СКАЛЯРНИМ КЕРУВАННЯМ

08-24.МКР.008.00.000 ТЗ

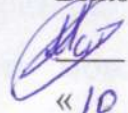
Керівник роботи

К.Т.Н., доц.

 Олена НАНАКА

«10» вересня 2024 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-23м

 Максим МАТЕВОСЯН

«10» вересня 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Автономний перетворювач вітроенергетичної установки на базі безконтактної електричної машини».

Скорочене найменування розробки – «Автономний перетворювач вітроенергетичної установки на базі безконтактної електричної машини».

Замовник – Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Вітроенергетична установка є автономним джерелом електроенергії для забезпечення потреб споживача. Електропривод ВЕУ забезпечує необхідні режими роботи вітроенергетичної установки відповідно до заданих алгоритмів функціонування, а також елементом спостереження за параметрами роботи вітроенергетичної установки, та продовження її експлуатаційного періоду.

4 Вимоги до розробки

Вітроенергетична установка повинна забезпечувати споживача електроенергією а також запасати її в акумуляторних батареях для живлення споживача в умовах не здатності генератора установки генерувати потужність. Топологія ЕТК повина мати можливість варіювання з використанням засобів силової електроніки (узгоджувальних DC/DC перетворювачів) з метою мінімізації габаритів і кількості компонентних блоків, в залежності від необхідності нарощування або скорочення генеруючих потужностей.

5 Комплектація розробки

Структура ВЕУ з магнітним редуктором включає в себе: ВК – вітроколесо; ВГ – вітрогенератор; СШ – сенсор швидкості; РШ – регулятор швидкості; LC – фільтр; АКБ – акумуляторна батарея; СКВ – система керування випрямлячем; СКІ – система керування інвертором.

6 Джерела розробки

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. – К.: ТОВ «ВіолаПрінт», 2008. – 55 с.
2. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
3. Chapin D. M., Fuller C. S., Pearson G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power // Journal of Applied Physics. – 1954. – Т. 25, №. 5. – Р. 676–677

7 Технічні характеристики

Потужність синхронного генератора, кВт	20
Кількість генераторів, шт.	1
Ємність акумуляторних батарей, кВт·год	10
Кількість акумуляторних батарей	4
Максимальна потужність контролера заряду АКБ, кВт	30
Кількість контролерів заряду АКБ	1
Максимальна потужність інвертора, кВт	250
Кількість інверторів	1

8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

9 Елементна база

I – контур стабілізації швидкохідного ротора МР шляхом зміни величини магнітного поля статора статичним ПЧ; II – контур рекуперації енергії статора МР; СШ – сенсор швидкості; СПР – сенсор положення ротора; ВК – вітроколесо; ТГ – тахогенератора; МР – магнітний редуктор; В – випрямляч; І – інвертор; С – конденсатор; L – індуктивність; СС - сенсор струму; СІФУ – система імпульсно-фазного управління; РШ – регулятор швидкості.

10 Конструктивне виконання

Складові установки виготовляються окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у пило-вологозахищеному виконанні.

11 Показники технологічності

Вітроенергетичний комплекс – генератор, контролер, АКБ та інвертор. Смарт-система – сенсори, модуль передачі даних та мікроконтролер. Виконується на сучасній елементній базі, його монтаж, заземлення, струмопровід повинні відповідати правилам улаштування електроустановок

12 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками відповідної кваліфікації та відповідний контингент фахівців, які займаються програмуванням робота. Технічний огляд механізму здійснюється мінімум один раз на 3 місяці. Ремонт здійснюється інженерами-електромеханіками та техніками-електромеханіками, фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

13 Живлення/генерація електропривода

Живлення електропривода повинно бути виконано напругою 380 В від

силової мережі підприємства.

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
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**АВТОНОМНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ
УСТАНОВКИ НА БАЗІ БЕЗКОНТАКТНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ
МАШИНИ**

Мета, задачі та об'єкт дослідження

Актуальність. Актуальним науково-технічним завданням можна вважати розробку вітроустановок (ВЕУ) з підвищеною енергоефективністю (ККД) та можливістю роботи при низьких швидкостях вітру. В якості електричних машин для вітрогенератора знайшли широке застосування синхронні генератори з постійними магнітами (СППМ) завдяки таким перевагам, як висока надійність, підвищений ККД (у порівнянні з асинхронними генераторами, АГ), знижений рівень шуму (у порівнянні з вентильними реактивними генераторами, ВРГ) та швидкий динамічний відгук (механічна постійна часу нижче ніж у АГ та ВРГ).

Об'єктом дослідження магістерської кваліфікаційної роботи є електротехнічний комплекс вітроенергетичної установки з горизонтальною віссю обертання

Предметом є методи підвищення енергоефективності вітроустановки з безконтактним генератором постійного струму.

Мета роботи полягає в дослідженні схем генерування енергії ВЕУ та розробці способів підвищення енергоефективності вітрогенераторів із безконтактною машиною постійного струму.

До **задач магістерської кваліфікаційної роботи** можна віднести:

- Провести аналіз схем ВЕУ і розробити на їх основі структурну схему ВЕУ на базі безконтактної електричної машини;
- Розробити технологічну, математичну і імітаційну моделі ВЕУ, провести дослідження ВЕУ для підвищення кутової швидкості вала ВГ в цілях стабілізації вихідної напруги і частоти ВГ;
- Виконати аналіз перехідних процесів ВГ на базі БМПС при зміні швидкості вітроколеса.
- Розробити схему і алгоритм автономного перетворювача для управління ВЕУ з урахуванням раціонального використання вітрових ресурсів.
- Визначити економічну ефективність використання ВЕУ.

ВДЕ на основі вітроенергетичних установок (ВЕУ)	
Виробництво електроенергії, млн кВт·год	Встановлена потужність, МВт
2010	2010
2011	2011
2012	2012
2013	2013
2014	2014
2015	2015
2016	2016
2017	2017
2018	2018
2019	2019
2020	2020
2021	2021
2022	2022
2023	2023
2024	2024
2025	2025
2026	2026
2027	2027
2028	2028
2029	2029
2030	2030

Встановлена потужність, МВт

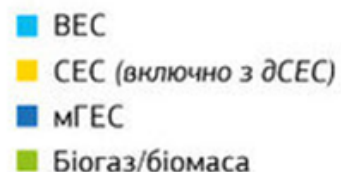
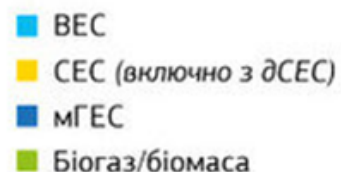


Рисунок 1 – Сектор відновлювальної енергетики в Україні

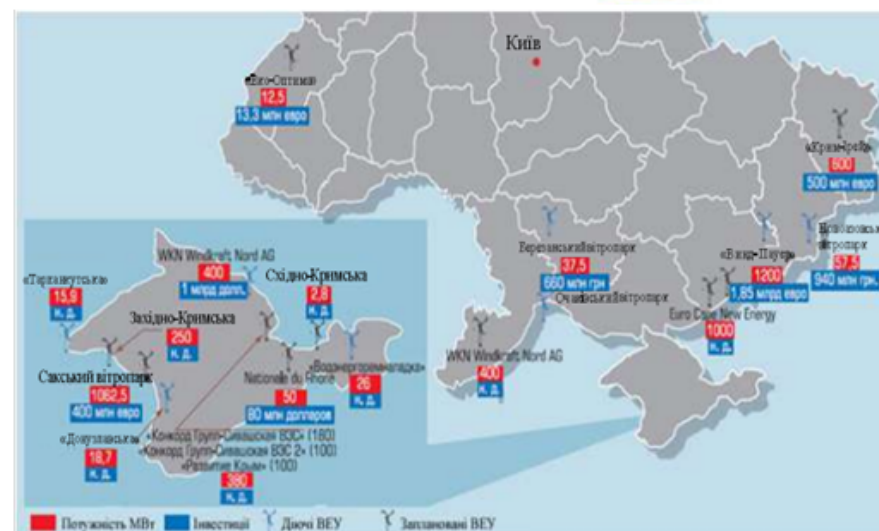


Рисунок 2 – Карта вітрових електростанцій України

Аналіз схем генерування електроенергії ВЕУ

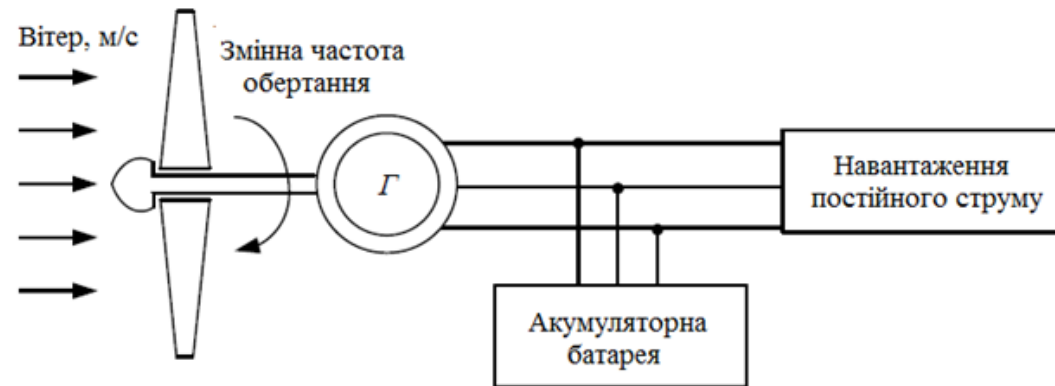


Рисунок 3 – Структурна схема генерування енергії ВЕУ

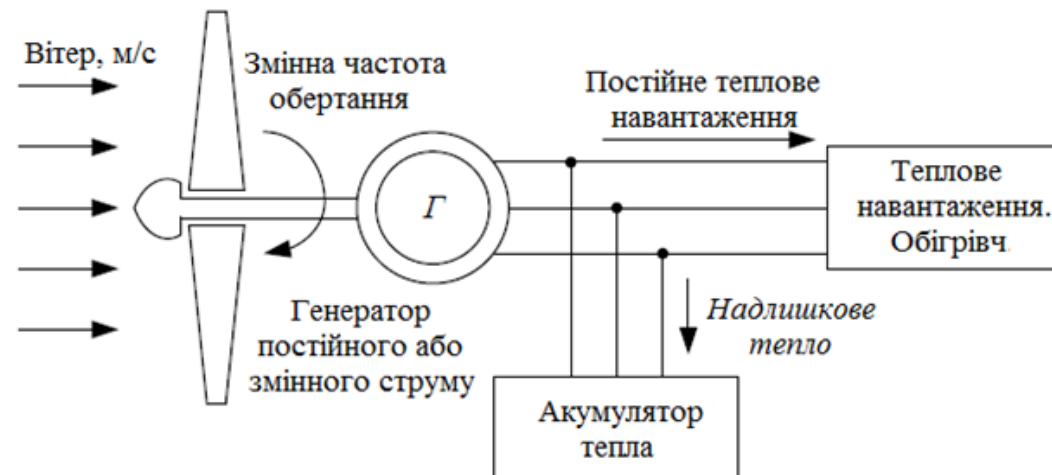


Рисунок 2 – Структурна схема генерування енергії ВЕУ з використанням теплового навантаження

Аналіз схем генерування електроенергії ВЕУ

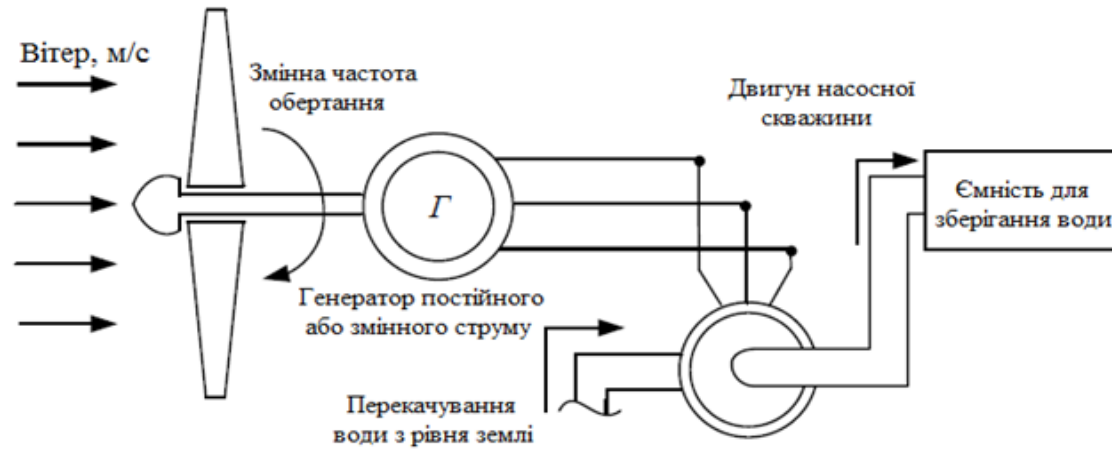


Рисунок 5 – Структурна схема генерування енергії ВЕУ з акумулюванням води для водопостачання

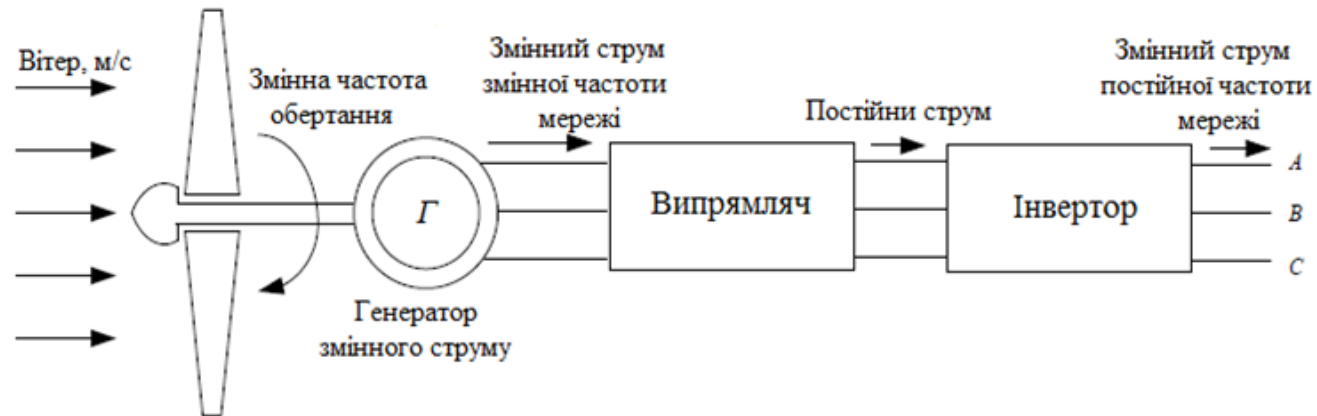


Рисунок 6 – Структурна схема генерування енергії ВЕУ з використанням випрямляча та інвертора

Класифікація та традиційна будова ВЕУ

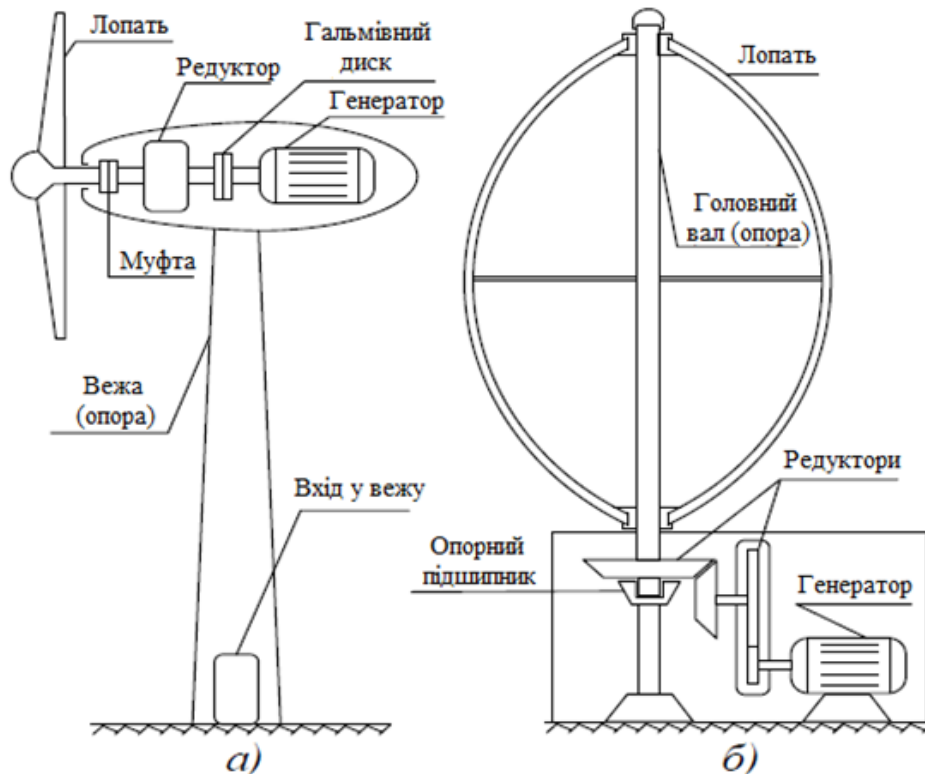
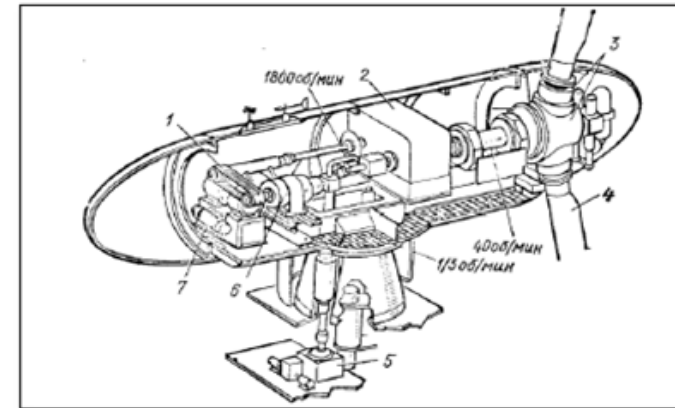


Рисунок 7 – Конструкція та основне обладнання ВЕУ:

- а. ВЕУ з горизонтальною віссю обертання;
б. ВЕУ з вертикальною віссю обертання



б)

Рисунок 8 – Основні механізми ВЕУ великої потужності (100 кВт): а. ВЕУ із клиноремінним редуктором; б. ВЕУ з мотор-редуктором (вбудованим планетарним редуктором)

Структурна схема побудови ВЕУ на базі БМПС



Рисунок 9 – Структурна схема моделі ВЕУ

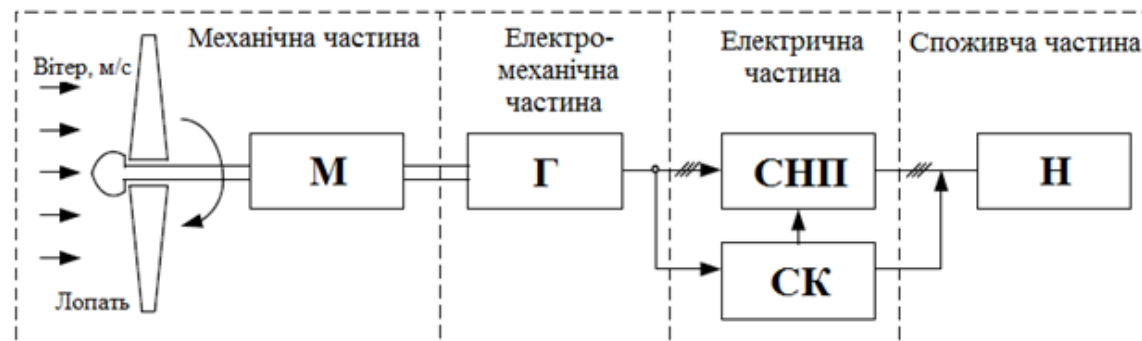


Рисунок 10 – Структурна частина схеми ВЕУ

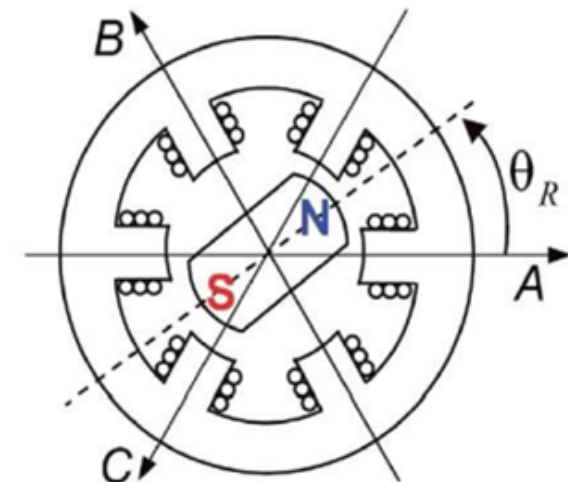


Рисунок 11 – Розріз двополісної БМПС

Математичні моделі електротехнічного комплексу ВЕУ

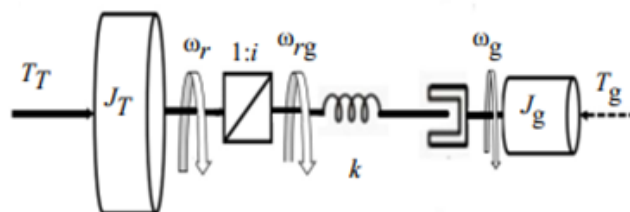


Рисунок 12 – Схема двомасової системи

$$\begin{aligned} T_{rg} &= i^{-1} \cdot T_r, \\ \omega_{rg} &= k \cdot \omega_r, \\ \sum J_{rg} &= J_g + k^{-2} \cdot J_r, \end{aligned} \quad (4.3)$$

де J_g – момент інерції генератора;

T_g – момент на валу генератора, який залежить від навантаження (від вихідної електричної потужності);

T_r – крутний момент турбіни, від коефіцієнта використання потужності та швидкості вітру;

J_r – момент інерції вітрогенератора;

ω_{rg} – частота обертання ротора генератора ($i \cdot \omega_r$);

i – коефіцієнт редукції (або коефіцієнт множення швидкості);

ω_r – частота обертання турбіни;

ω_g – частота обертання генератора;

T_r – крутний момент турбіни, що передається до валу генератора;

$\sum J_{rg}$ – сумарний момент інерції генератора та вітрогенератора;

k – коефіцієнт пружності валу.

Таким чином, рівняння обертального руху можна описати наступним виразом:

$$T_{rg} - T_g = \sum J_{rg} \cdot \frac{d\omega_{rg}}{dt}. \quad (4.4)$$

Математична модель, яка найбільш повно описує всі особливості роботи електронного комутатора при формуванні напруги живлення БМПС має вигляд:

$$\begin{cases} u_a = R_{ph} \cdot i_a + L_{ph} \frac{di_a}{dt} + e_a + u_n; \\ u_b = R_{ph} \cdot i_b + L_{ph} \frac{di_b}{dt} + e_b + u_n; \\ u_c = R_{ph} \cdot i_c + L_{ph} \frac{di_c}{dt} + e_c + u_n; \\ u_n = \frac{1}{3} [u_a + u_b + u_c - (e_a - e_b - e_c)]; \\ M_{EM} = k_t \cdot (i_a \cdot e_{1a} + i_b \cdot e_{1b} + i_c \cdot e_{1c}), \end{cases}$$

де R_{ph} – фазний опір обмотки статора;

L_{ph} – індуктивність обмотки статора;

$i_{a,b,c}$ – миттєві значення струмів, що протікають у фазах А, В, С статорної обмотки відповідно;

$u_{a,b,c}$ – миттєві значення напруги, поданої на фази А, В, С статорної обмотки відповідно;

$e_{a,b,c}$ – миттєві значення проти-ЕРС, наведених у фазах А, В, С статорної обмотки відповідно;

u_n – напруга нейтралі;

M_{EM} – електромагнітний (генераторний) момент, що розвивається БМПС;

k_t – коефіцієнт моменту БМПС;

$e_{1a,1b,1c}$ – поодинокі функції форми проти-ЕРС у фазах А, В, С статорної обмотки відповідно.

Система електропривода ВЕУ на основі ПЧ

5

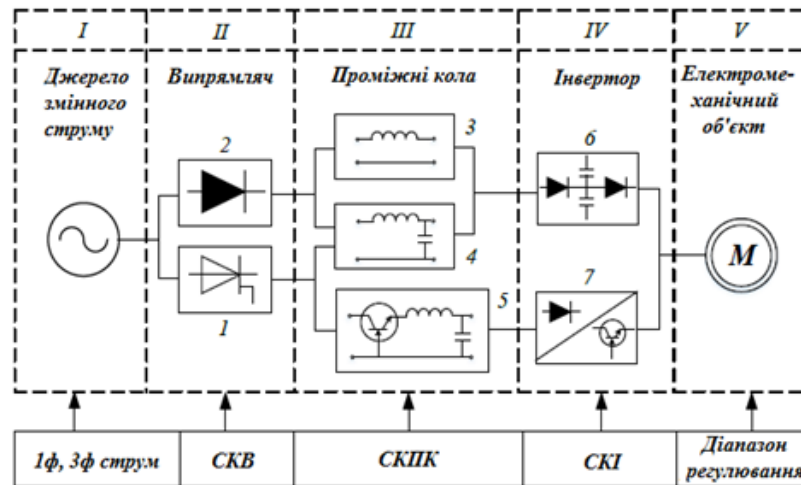


Рисунок 11 – Структурна частина схеми ВЕУ

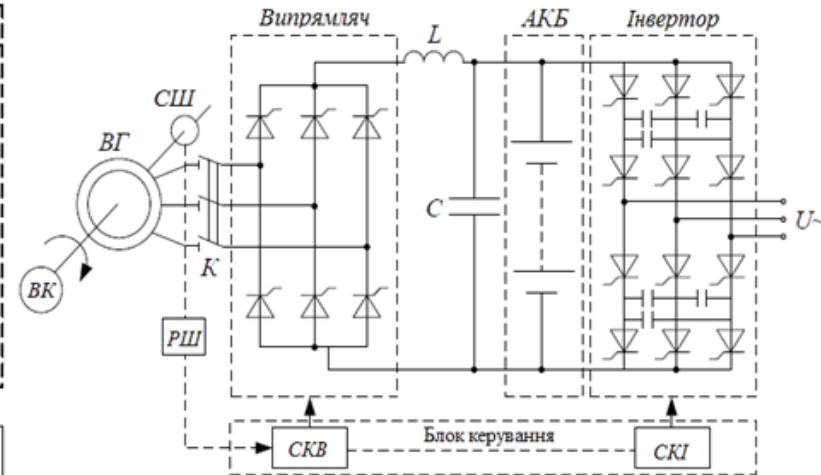


Рисунок 12 – Силова схема генерування ВЕУ на основі випрямляча та інвертора

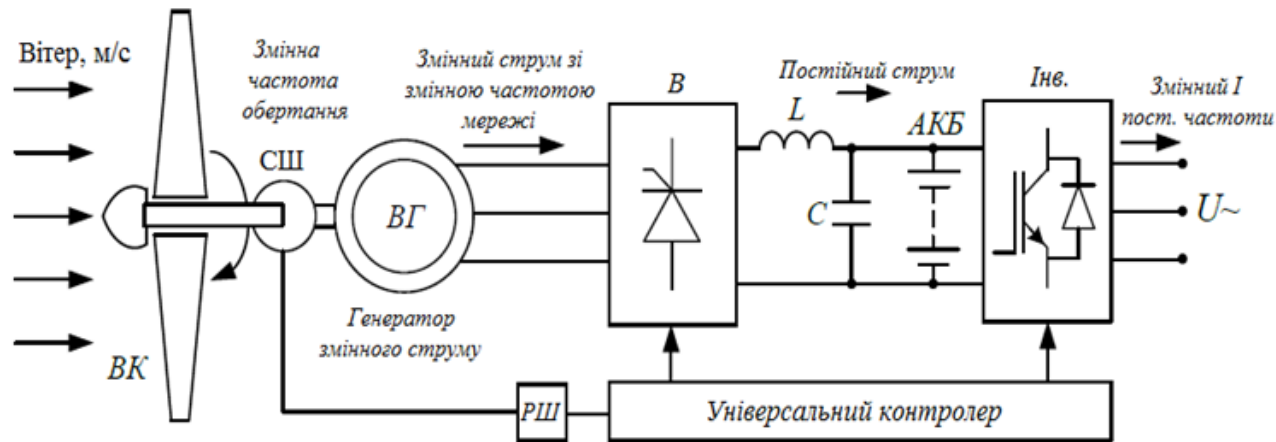


Рисунок 13 – Структурна схема генерування ВЕУ на основі випрямляча та інвертора

Система векторного керування ВЕУ

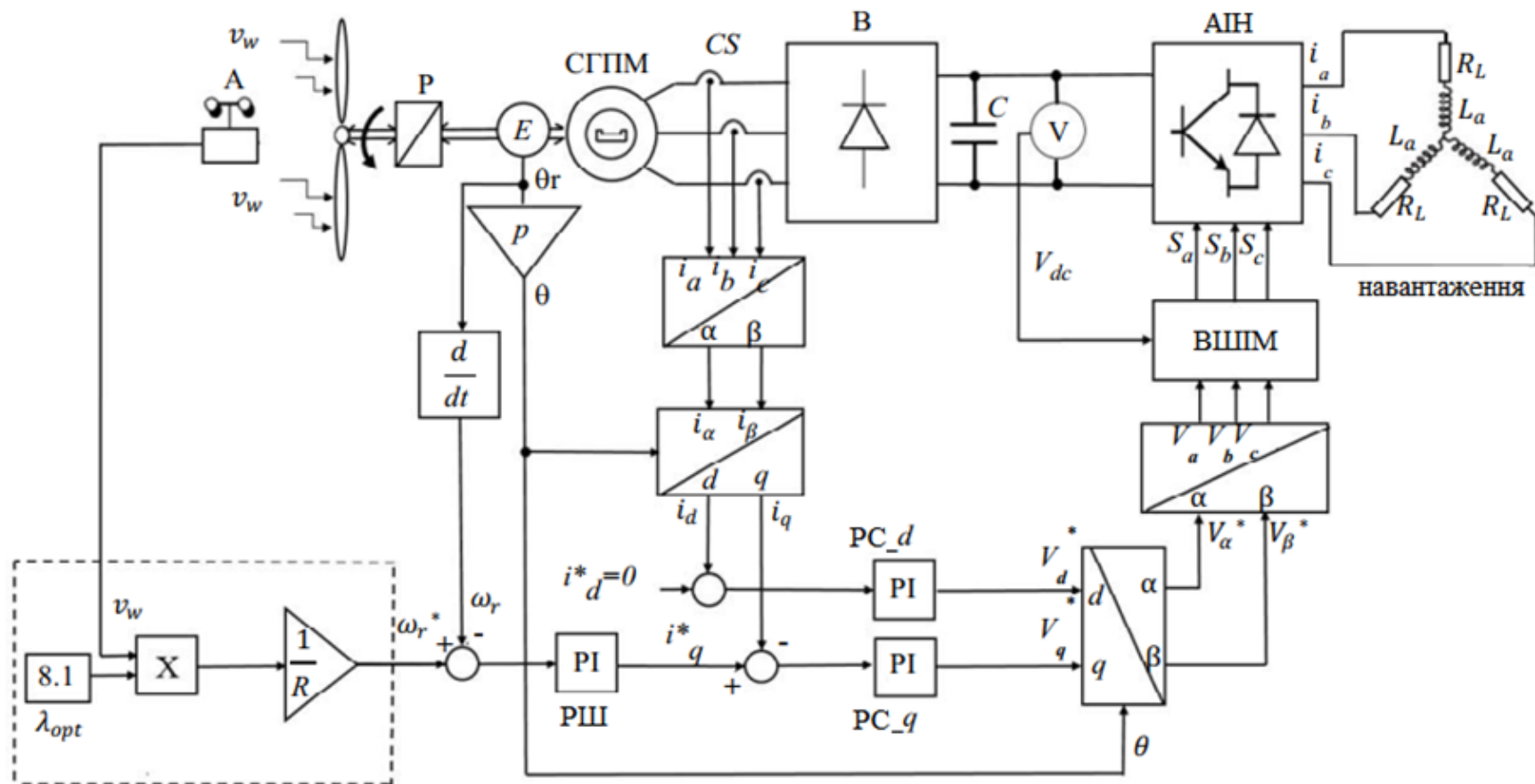


Рисунок 14 – Структурна схема системи векторного управління СДПМ

Алгоритм автоматизованого керування ВЕУ

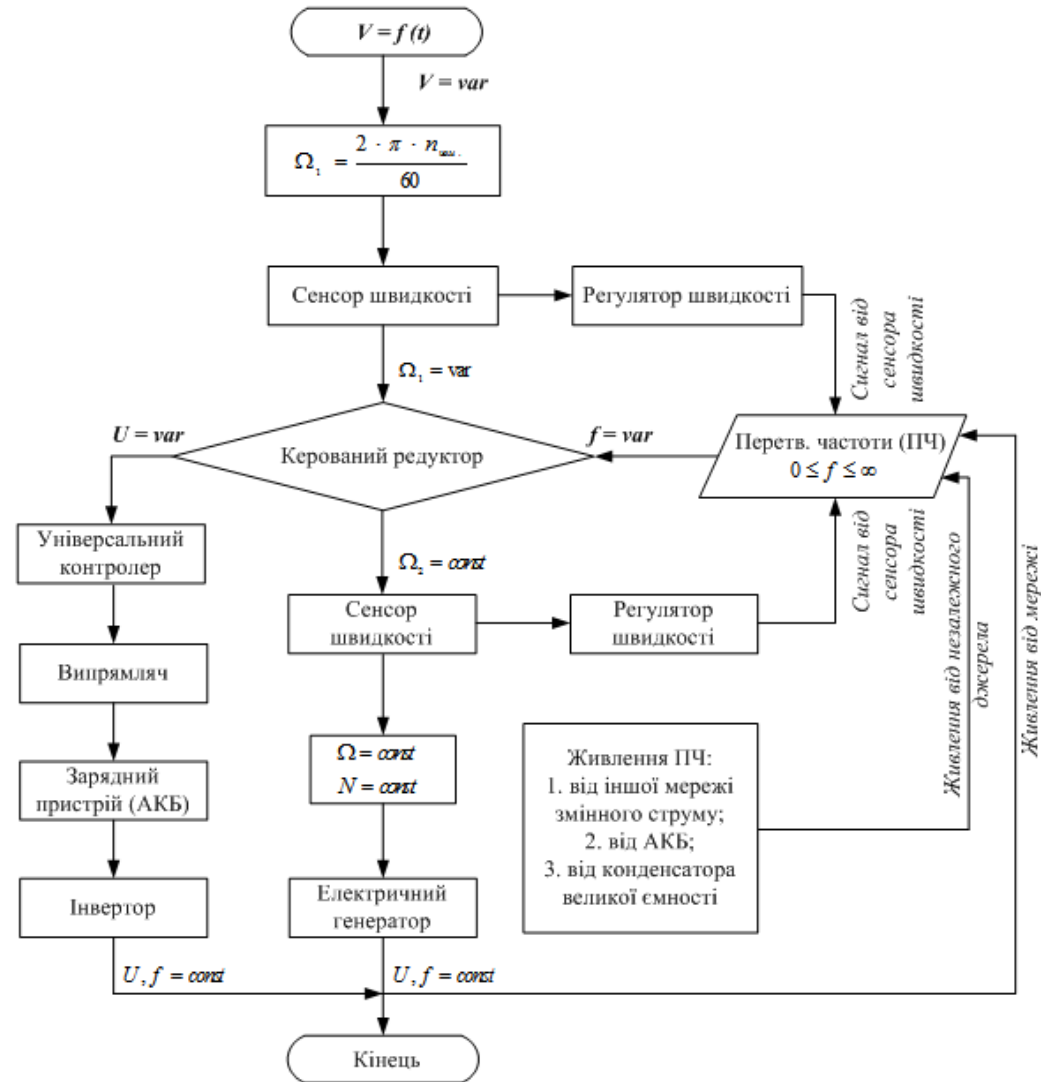


Рисунок 15 – Алгоритм автоматизованої роботи ВЕУ

Моделювання роботи БМПС ВЕУ

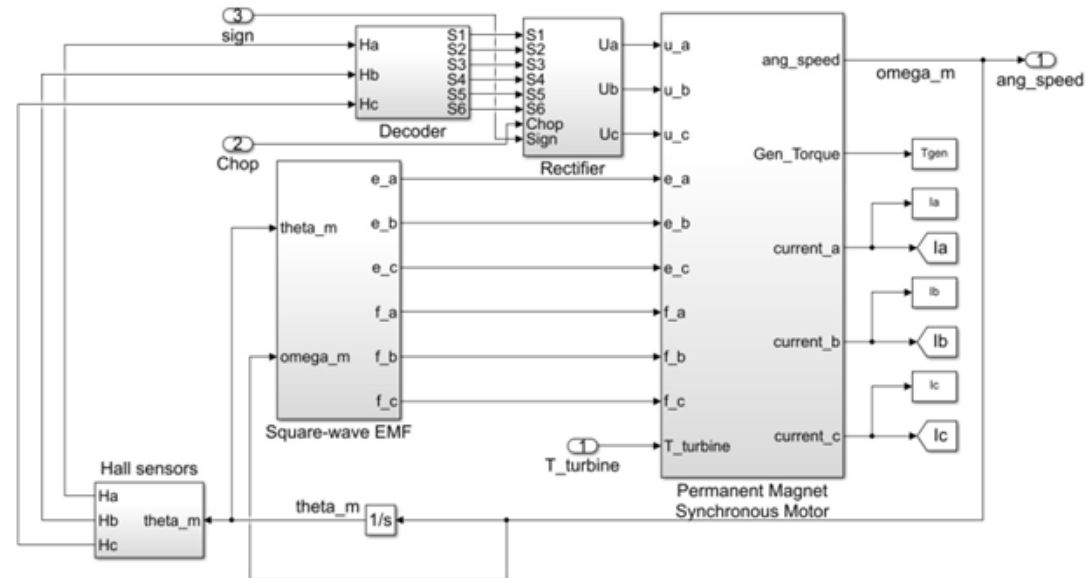


Рисунок 16 – Загальна структура моделі БМПС

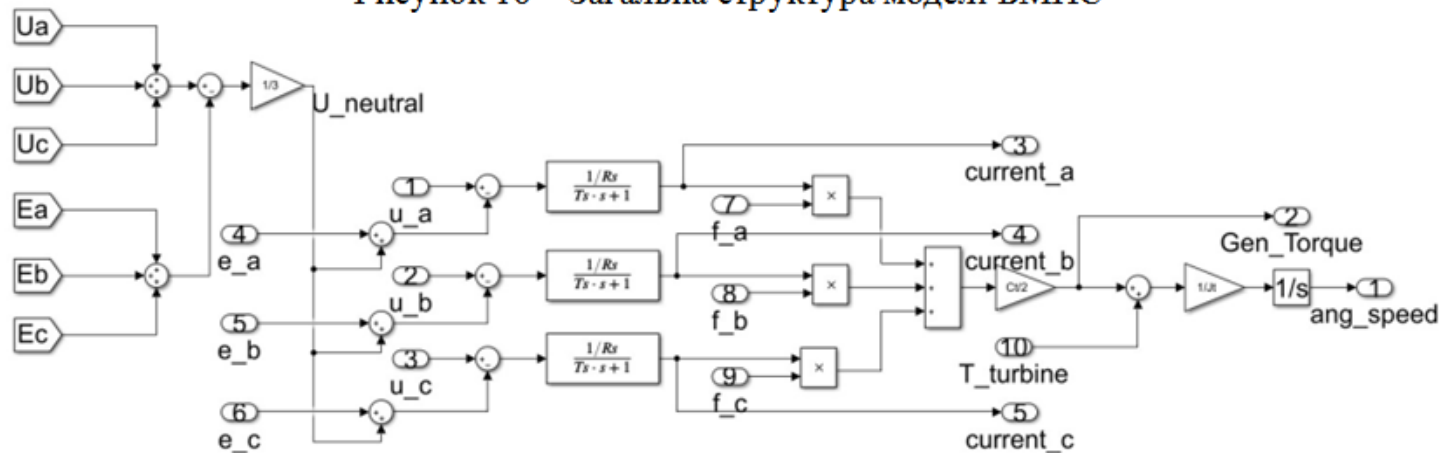


Рисунок 17– Модель електродинамічної, електромеханічної та механічної частини БМПС

Моделювання роботи БМПС в складі ВЕУ

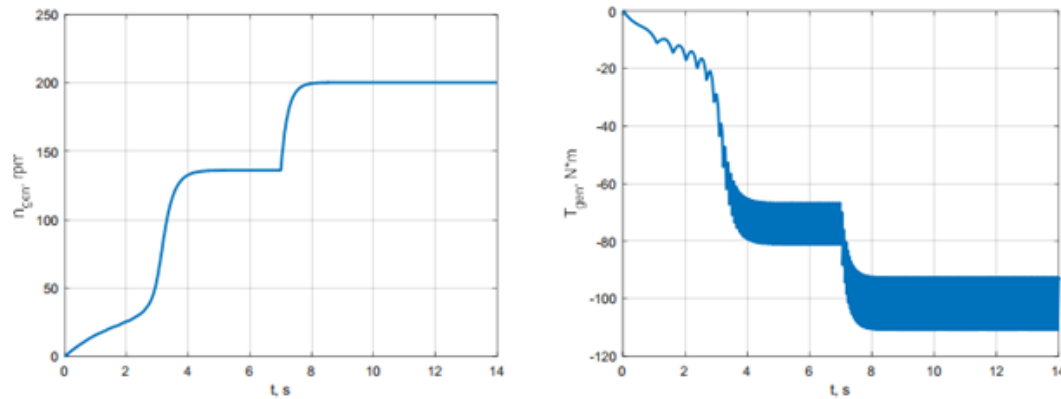


Рисунок 18 – Перехідні процеси по моменту та швидкості обертання валу генератора

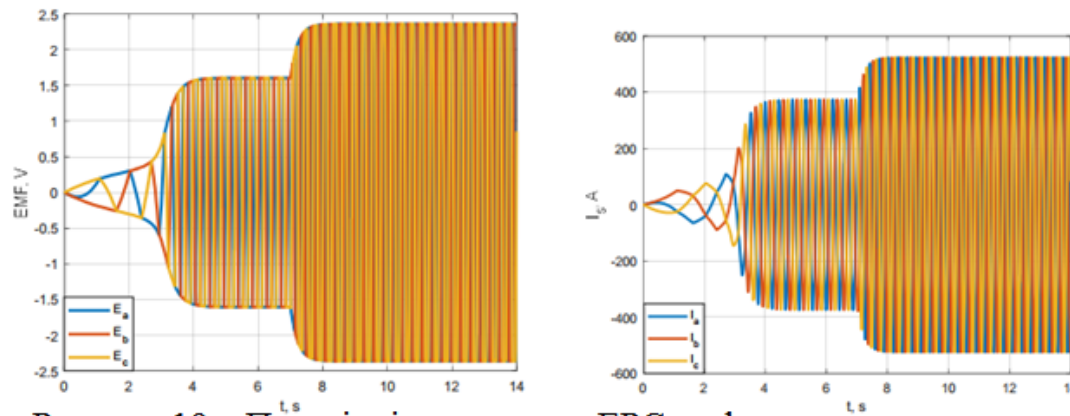


Рисунок 19 – Перехідні процеси по ЕРС та фазним струмам генератора

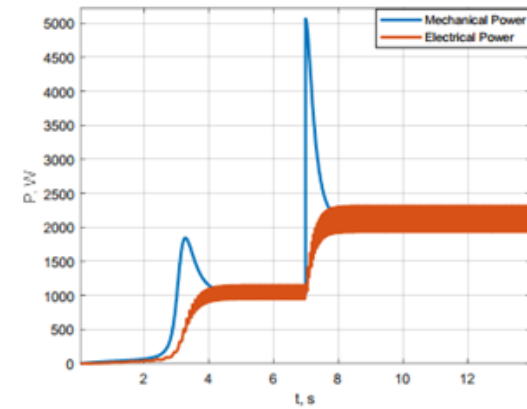
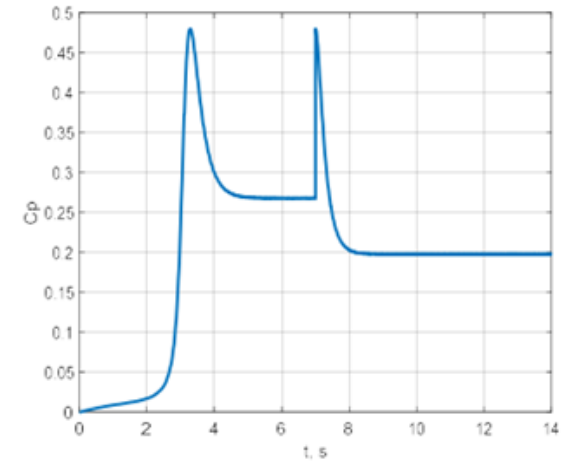


Рисунок 20 – Перехідні процеси по коефіцієнту використання енергії вітру турбіни та механічній потужності на її лопатях і вихідній електричній потужності

Висновки

1. Аналіз схем генерування ВЕУ показав, що всі схеми розроблені з урахуванням характеристики споживачів і немає ніяких універсальних схем генерування енергії, що дозволило б застосувати їх у всіх об'єктах електропостачання, незалежно від роду струму та напруги. Крім того, схеми генерування ВЕУ є складними і з точки зору економічних показників не завжди рентабельні.

2. Запропоновані математичні та комп'ютерні моделі вітротурбіни малої потужності горизонтальною віссю, безконтактної машини постійного струму, моделювання аеродинаміки вітротурбіни в Simulink та математична модель БМПС в Simulink. Розроблено математичну модель аеродинаміки вітротурбіни з горизонтальною віссю. Складено імітаційну модель вітроустановки в Simulink для різних значень швидкості вітру (6-15 м/с).

3. Створена імітаційна модель вітроустановки в Simulink для різних значень швидкості вітру (4...16 м/с). Розглянуто вплив вугла атаки лопастей на швидкохідність турбіни. Отримано залежність потужності ветротурбіни від її швидкості та визначено значення максимального коефіцієнта використання потужності турбіни.

4. Запропоновані схема векторного керування ВЕУ працює в режимі підтримки максимуму потужності підвищення ККД вітротурбіни, забезпечуючи оптимальну швидкість обертання турбіни. При цьому швидкість обертання турбіни, необхідна для підтримки в системі оптимального значення швидкохідності, що забезпечує максимум потужності, розраховується для конкретного значення швидкості вітру.

5. Алгоритм автоматизованої роботи і регулювання електромеханічних частин ВЕУ дозволяє максимально використовувати потужність вітру при його різкому збільшенні.

6. Виконано розрахунок ефективності капіталовкладень для впровадження електротехнічного комплексу на основі ВЕУ.

7. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації ВЕУ в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

РОБОТИ

Назва роботи: «Автономний перетворювач вітроенергетичної установки на базі безконтактної електричної машини»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-23м

Науковий керівник: к.т.н., доц. Нанака О.М.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності Turnitin

Оригінальність	82 %
Загальна схожість	18 %

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.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор _____
(підпис)

Матевосян М.М.
(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Ладное О.А.

(прізвище, ініціали)

Эксперт

(за потреби) _____ (підпис)

(прізвище, ініціали, посада)

					08-24.МКР.008.00.000			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Автономний перетворювач вітроенергетичної установки на базі безконтактної електричної машини	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Матевосян М.М.		18.11.24				
Перевірів		Нанака О.М.		19.11.24				
Т. контр.								
Рецензу		Батенко О.А.		07.12.24		Аркуші		Аркушів
Норм.кон.		Парко С.А.		14.12.24		ВНТУ, гр. ЕПА-23м		
Затверд.		Мошноріз М.М.		14.12.24				