

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)
Прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Математичне моделювання комбінованої системи
електропостачання на основі вітроустановки малої потужності

Виконав: студент (ка) 2 курсу, групи ЕТм-61

спеціальності 141–

електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Галичак Н.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник _____
(підпис) Буняк О.А.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____
(підпис) Мовчан Л.Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____
(підпис) Тарасенко М.Г.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
 (повна назва факультету)
 Кафедра електричної інженерії
 (повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри ЕІ

 (підпис) Тарасенко М. Г.

 (прізвище та ініціали)
 “ 13 ” листопада 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
 (назва освітнього ступеня)
 за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 (шифр і назва спеціальності)
 студенту Галичаку Назару Михайловичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Математичне моделювання комбінованої системи електропостачання на основі вітроустановки малої потужності
 Керівник роботи Буняк Олег Андронікович, к.т.н., доцент,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від “10” листопада 2023 р. № 4/7-1040

2. Термін подання студентом завершеної роботи 15 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи вітроенергетична установка (ВЕУ) з потужністю 8 кВт; вітрогенератор з горизонтальною віссю обертання; резервне живлення – дизель-генератор

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. 1. Аналітичний розділ. 2. Проектно-конструкторський розділ. 3. Розрахунково-дослідницький розділ. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Особливості роботи вітроенергетичної установки; Варіанти побудови комбінованої системи електропостачання на основі ВЕУ; Оцінка вітрового потенціалу Тернопільської області; Основні елементи комбінованої системи на основі ВЕУ; Математична модель ВЕУ на її структурних елементів; Структурна схема керування режимами роботи; Результати імітаційного моделювання.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доцент Гурик О.Я.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	старший викладач Клепчик В.М.		

7. Дата видачі завдання _____ 13 листопада 2023 року _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та патентний пошук	15.10.23 - 01.11.23	
2	Аналітичний розділ	15.10.23 - 01.11.23	
3	Розрахунково-дослідницький розділ	15.10.23 - 01.11.23	
4	Проектно-конструкторський розділ	15.10.23 - 01.11.23	
5	Заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	15.10.23 - 01.11.23	
6	Формування пояснювальної записки та плакатів по кваліфікаційній роботі	01.11.23 - 15.12.23	
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи	16.12.23 - 20.12.23	

Студент

(підпис)

Галичак Н.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Буняк О. А.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм-61. – Тернопіль.: ТНТУ, 2023.

У кваліфікаційній роботі проведено математичне моделювання роботи комбінованої системи електропостачання на основі вітроенергетичної установки.

Для проведення обчислювальних експериментів здійснено проектування вітроенергетичної установки для приватного домогосподарства на основі синхронного генератора з постійними магнітами та дизель-генератора в якості резервного живлення.

Проведена побудова математичних моделей елементів комбінованої системи електропостачання та запропонована структурна схема керування режимами роботи.

Проведено імітаційне моделювання режимів роботи комбінованої системи електропостачання в середовищі *MatLab Simulink* при змінних вхідних параметрах швидкості вітру та потужності навантаження.

Ключові слова: комбінована система електропостачання, вітрова установка, математична модель.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Особливості автономної роботи вітроенергетичних установок	8
1.2 Аналіз систем комбінованого енергопостачання на основі ВЕУ	10
1.3 Класифікація вітрових генераторів	19
1.4 Аналіз дизель-генераторів	20
1.5 Висновки до першого розділу	21
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	23
2.1 Оцінка вітроенергетичного потенціалу Тернопільської області	23
2.2 Розрахунок споживаної потужності	29
2.3 Вибір елементів комбінованої системи електропостачання ВЕУ	32
2.4 Вибір дизель-генераторної установки	39
2.5 Висновки по другому розділу.....	41
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	42
3.1 Моделювання вітроенергетичної установки	42
3.2 Моделювання дизель-генератора	48
3.3 Моделювання акумуляторної батареї	51
3.3.1 Ланки заряду та розряду АКБ	53
3.4 Висновки до третього розділу	59
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	61
4.1 Захисні міри для роботи з електроустановками напругою 0.38 кВ	61
4.2 Основні принципи та способи захисту працівників та території підприємства при виникненні надзвичайних ситуацій	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	70

ВСТУП

Актуальність теми. Децентралізація енергетичних ринків країни призвела до появи споживачів, що орієнтуються на використання систем з відновлювальними джерелами енергії (*ВДЕ*). Основні причини: зростання тарифів на електро- та тепlopостачання від централізованих електричних мереж; скорочення субсидій на викопне паливо; зниження цін на елементи *ВДЕ*, через інноваційні технології виробництва та компенсації витрат на будівництво та обладнання [1, 2].

Найбільш перспективним варіантом для домогосподарств малої потужності є автономні комбіновані системи на основі вітрових електроустановок (*BEU*), особливо в умовах швидкого їх впровадження й простої схемної реалізації [3, 4].

Аналіз використання вітрових систем показав невідповідність вказаних технічних параметрів елементам установок при використанні в реальних умовах, де енергетичний потенціал вітру вимагає прийняття різних схемотехнічних рішень для отримання необхідної ефективності генерування електричної енергії. Для забезпечення безперебійної роботи та надійності електропостачання перспективним варіантом є побудова автономних комбінованих систем, з інтеграцією дизельної системи в систему вітрових установок [5].

Але описані системи на основі використання вітрового потенціалу мають суттєвий недолік – низька прогнозованість генерації та неможливість керування процесами з заданою точністю у відповідності з заданими графіками електроспоживання.

Тому, виникає необхідність проведення оцінки стійкості розроблених вітроенергетичних установок при різних режимах роботи на основі побудови імітаційних моделей з можливістю зміни швидкості вітрового потоку та потужності навантаження.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є математичне моделювання комбінованої системи електропостачання на основі вітроенергетичної установки для дослідження стійкості при різних режимах роботи.

Відповідно до вказаної мети поставлені наступні завдання:

- провести аналіз особливостей автономної роботи вітроенергетичної установки та побудови систем комбінованого енергопостачання на їх основі;
- провести аналіз вітроенергетичного потенціалу Тернопільської області для оцінки діапазону зміни швидкості вітрового потоку;
- на основі проведеного розрахунку навантажень приватного домогосподарства здійснити вибір елементів автономного енергетичного комплексу;
- здійснити побудову математичної моделі та її елементів для дослідження оцінки стійкості при різних режимах роботи;
- провести обчислювальні експерименти роботи комбінованої вітроенергетичної установки при різних значеннях швидкості вітрового потоку та потужності навантаження й здійснити аналіз отриманих результатів моделювання.

Об'єкт дослідження – процеси електричної генерації на основі відновлювальних джерел енергії.

Предмет дослідження – математичне моделювання режимів роботи комбінованої вітроенергетичної установки малої потужності.

Наукова новизна отриманих результатів.

- отримало подальший розвиток застосування методів математичного моделювання для оцінки надійності роботи комбінованих систем електропостачання на основі вітроустановки при різних режимах роботи.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані математичні моделі дозволяють проводити оцінку надійності роботи комбінованих вітроустановок при різних значеннях швидкості вітрового потоку та потужності навантаження.

Апробація.

Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на XII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“ (6-7 грудня 2023 року), Тернопіль, Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (22 найменування).

Загальний обсяг текстової частини – 72 сторінки, 8 таблиць, 38 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Особливості автономної роботи вітроенергетичних установок

Для автономної роботи системи електропостачання на базі вітроенергетичної установки (ВЕУ) проведемо аналіз вітрогенератора з горизонтальною віссю обертання (рисунок 1.1) [6].



Рисунок 1.1 Пристрій вітрогенератора.

Основні компоненти ВЕУ визначають його роботу: в якості обертового елемента використовується ротор, що складається з лопатей та ступиці, які визначають потужність та обертання вітродвигуна; через первинний та вторинний вали ротор під'єднаний до генератора, який генерує електроенергію. Керування генератором здійснюється контролером (ЧПУ управління).

Визначення напрямку вітру відбувається за допомогою датчика вітру, який орієнтує турбіну за напрямком руху повітряних мас через поворотні механізми та з'єднаний з контролером для передачі даних [6].

Постійна складова генерованої енергії *BEU* акумулюється на акумуляторних батареях (*АКБ*), які виконують дві функції: перша – накопичення електроенергії для подальшого використання при відсутності вітру; друга – стабілізація електричної енергії від генератора. При комбінованій роботі *BEU* (дизель-генератор; централізована мережа; сонячні панелі) для перемикання між джерелами енергії в залежності від погодних умов задіюється пристрій автоматичного введення резерву (*АВР*). Для забезпечення споживача енергією зі змінною складовою в системі *BEU* використовують інвертор (перетворення постійної складової струму в змінну складову) [6].

Аналіз застосування енергії вітрового потоку на основі *BEU* показав, що швидкість вітру є випадковою величиною. Це призводить до зміни обертання вітрового колеса *BEU* та, відповідно, зміни напруги й мінливості її характеристик за амплітудою, частотою та фазою. Відімкнення навантаження також є дестабілізуючим фактором – призводить до зміни параметрів генерування. На практиці, за рахунок кінетичної енергії вітру, лопаті турбіни вітрового колеса починає обертатися, що приводить до обертання ротора генератора, який знаходиться на спільному валу з турбіною. Обертання ротора генератора призводить до генерації змінного електричного струму, який передається на контролер, перетворює в постійну складову та заряджає *АКБ*. Інвертор в подальшому перетворює струм в змінну складову напругою 220 В, частотою – 50 Гц. Слід відзначити, що можливості інвертора стосовно підтримування заданих параметрів вихідної напруги обмежені [6-8].

Крім цього, як правило, генерація електричної енергії *BEU* не співпадає з графіком навантаження споживача, що призводить до необхідності створення запасу енергії на *АКБ* [8].

Таким чином, проблеми генерації електричної енергії на основі *BEU*

пов'язані зі змінним характером вітрового потоку, що вимагає суміщення різних типів джерел генерації, а також створення систем акумуляції енергії, які здатні зберігати великий запас електричної енергії.

Технічними проблемами децентралізованих систем електропостачання, які використовують відновлювальні джерела енергії (*ВДЕ*) є [7]:

1. Змінні в часі енергії первинного носія енергії та стохастичний характер навантаження споживача – необхідно гарантоване джерело живлення, яке забезпечить споживача електроенергією в період відсутності або недостатності первинного відновлювального ресурсу.

2. Сумірність потужності джерел генерування та електричного навантаження знижує загальний рівень надійності електропостачання споживачів та негативно впливає на якість генерованої електроенергії – необхідно гарантоване джерело живлення, що забезпечить споживача якісною електричною енергією як в статичних так і в динамічних режимах зміни навантаження.

3. Сильно виражена залежність потужності, що генерується пристроями *ВДЕ*, від параметрів відновлювального енергоресурсу (для *ВЕУ* – трикратна залежність вихідної потужності від швидкісних параметрів вітру) вимагає присутність в енергетичній системі пристроїв, що обмежують вихідну потужність, або розсіюють генеровану електроенергію – пристроїв акумулювання енергії в періоди пікової потужності первинного носія.

1.2 Аналіз систем комбінованого енергопостачання на основі ВЕУ

Автономні системи енергопостачання повинні забезпечувати високий рівень надійності, мати прийнятні розміри та вартість, мінімальні затрати на обслуговування. Перелічені вимоги повинні витримувати конкуренцію у порівнянні з технічними рішеннями класичної енергетики – прокладання кабельних ліній, систем газопостачання або, у разі відсутності електричних

мереж, автономним електроживленням від бензинових, газових та дизельних електрогенераторів [4].

Схема гібридної установка повинна передбачати як електропостачання від комплексного джерела енергії розрахованої потужності (вітрова, сонячна енергія), так і за рахунок зменшення чи збільшення кількості компонентів із відповідною зміною потужності без заміни вихідних каскадів обладнання: регулятори потужності, інвертори. В умовах непередбачуваності швидкості вітру та інтенсивності сонячної радіації є менш раціональною, проте найбільш надійною генеруючою системою електроенергії, побудованою на комбінуванні відновлюваних джерел. Надійність системи досягається дублюванням і взаємним доповненням одного джерела іншим (за відсутності вітру, система працює від сонячного світла чи навпаки з акумулюванням енергії та забезпечення безперебійного енергопостачання).

Як свідчать публікації та розробки, важко передбачити питоме вироблення енергії в конкретному регіоні за рахунок відновлюваних джерел [4-8]. Тобто, практично неможливо розрахувати точну встановлену потужність генеруючого обладнання для певного споживача з його особливостями і графіком споживання в локальних кліматичних умовах.

У зв'язку з цим найпростішим рішенням є встановлення мінімальної гібридної конфігурації з подальшим збільшенням кількості компонентів, або заміні малих агрегатів більшими. У разі гібридної системи такі заходи забезпечують безперебійне енергопостачання споживача навіть під час заміни завдяки взаємному дублюванню. Ця перевага може бути використана для об'єктів, які не підлягають вимкненню в будь-якому випадку.

Головною ознакою комбінованих систем є одночасне використання різних за походженням видів палива: традиційних та відновлювані джерела енергії (ВДЕ).

Комбіновані системи здатні вирішувати проблеми відсутності поблизу об'єкта ліній електропередачі та/або централізованого міського опалення. Таким

чином, унеможлиблюється залежність власників заміських будинків від комунальних служб та забезпечуються комфортні температурні умови з урахуванням індивідуальних вимог конкретного об'єкта споживання.

Комбіноване енергопостачання є спільною генерацією електричної та теплової енергій в одній системі [1-4].

Одним із принципів функціонування означених систем електропостачання є почергове використання двох акумуляторних батарей (*АКБ*), де, одна призначена виключно для заряду акумулятора, а інша – тільки для розряду (електропостачання навантажень споживачів). Почергове використання двох акумуляторів підвищує час автономної роботи. Структурна схема такої автономної системи подано на рисунку 1.2 [9].

У момент запуску навантаження (1) через інвертор (2), силовий комутатор (3) підключається до однієї з акумуляторних батарей, які були попередньо заряджені, наприклад, *АКБ* (5) має напругу на клеммах вищу, ніж напруга іншої *АКБ* (6). Блок управління (4) формує відповідні сигнали керування силовому комутатору (3), який передбачає підключення тільки однієї *АКБ* – (5) або (6) до інвертора (2).

Блок управління (4) порівнює значення напруги *АКБ* (5) та (6) для подальшого вибору при запуску системи. При зниженні напруги на працюючій *АКБ*, блок керування (4) підключає *АКБ* (6) до *АКБ* (5) через конвертор (8) для підзарядки. У процесі зарядки одного з акумуляторів відбувається періодичний вимір напруги акумулятора, що заряджається, і проводиться порівняння наступного значення з попереднім. Якщо різниця між цими значеннями менше деякого значення ΔU , то процес заряду припиняється шляхом відключення конвертора. Враховуючи, що час заряду *АКБ* (5) менший часу розряду *АКБ* (6) при роботі навантаження в номінальному режимі, то на моменту мінімально допустимого рівня напруги на *АКБ* (6), *АКБ* (5) буде повністю заряджена.

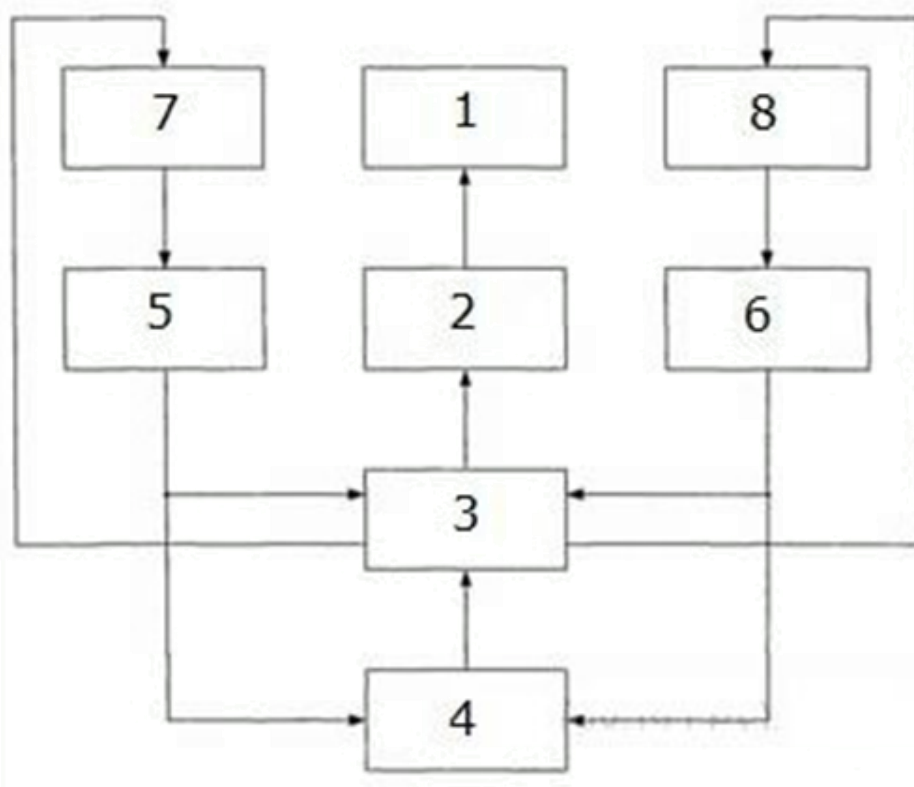


Рисунок 1.2 – Гібридна система енергопостачання із почерговим використанням двох АКБ [9].

Переваги системи: швидкий заряд АКБ імпульсами напруги; автономний робота без застосування додаткових джерел енергії; відсутність шуму; компактність.

У віддалених від централізованого електропостачання (ЦЕП) місцях вітроенергетична установка (ВЕУ) може бути єдиним джерелом, так як накопичує електроенергію в АКБ та працює в автономному режимі (без енергомережі). Єдиним обмеженням є можливість відсутності вітру [7]. Схема автономної роботи ВЕУ подано на рисунку 1.3.

Для забезпечення електричною енергією споживачів при відсутності вітру використовують комбіновані системи, де ВЕУ працює паралельно з іншими джерелами живлення (сонячні модулі, дизель-генератор, мікро-ГЕС).

Спільна робота ВДЕ з традиційними джерелами забезпечують надійне електропостачання [7].

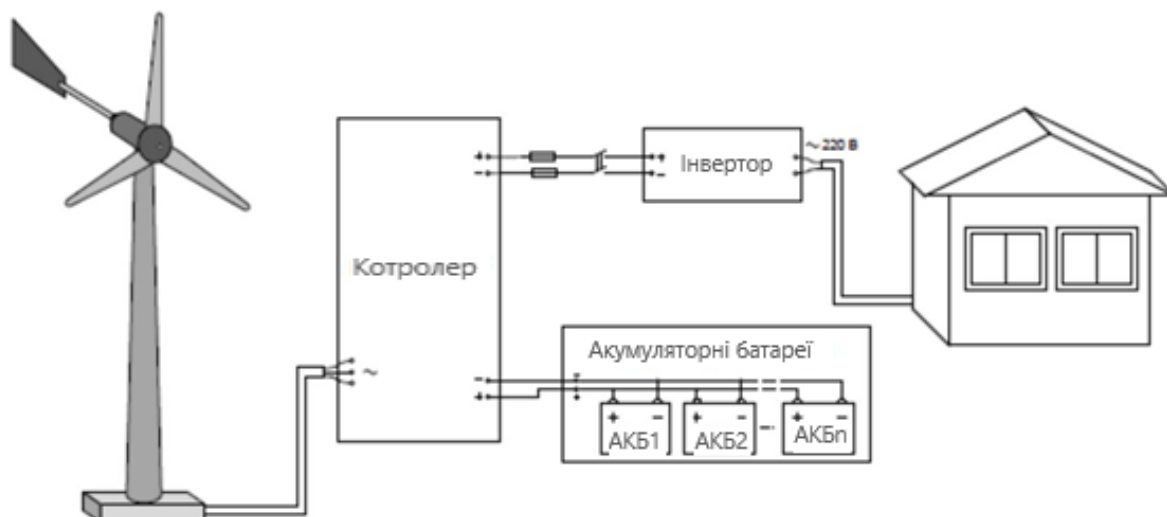


Рисунок 1.3 – Схема автономної ВЕУ.

Як резервне джерело електропостачання в описану систему з ВЕУ вводиться дизельний генератор (ДГ), який підвищує надійність системи та дозволяє здійснювати безперебійне енергопостачання, не зважаючи на погодні умови представлена на рисунку 1.4. система містить вітроелектричну установку; резервний дизель-генератор ($P_{ном} = 3 - 20 \text{ Вт}$); блок безперебійного живлення з вбудованим контролером «заряд-розряд», АКБ.

ДГ як резервне джерело електропостачання планується використовувати в години пікового навантаження або вечірні години, при відсутності необхідної потужності вітроенергетичної системи для заряду акумуляторів або/та електропостачання споживачів.

Використання ДГ зводить до мінімуму кількість запусків генератора та, відповідно, збільшує термін його служби.

Схема, яка має кращі техніко-економічні характеристики, будується з використанням гарантованого джерела електроенергії – дизельного генератора (ДГ) та нестабільного ДВЕ [6].

Скорочення часу роботи дизельної електростанції забезпечує економію дизельного палива та збільшення періоду експлуатації дизельної електростанції.

У період високої генерації від *ВЕУ*, *ДГ* відключена. Коливання споживаної та генерованої від *ВДЕ* потужності демпфірується запасом енергії у *ДБЖ*, що знижує кількість запусків та форсувань *ДГ*.

Залежно від співвідношення потужностей *ДГ* та *ВЕУ* можливо передбачувати як їхню роздільну роботу, так і паралельну.

Вочевидь, при режимі роздільної роботи необхідна велика встановлена потужність *ППЕ* поновлюваного джерела. Як правило, миттєва потужність відновлюваного енергоресурсу може суттєво перевищувати номінальне навантаження. Тому, для використання надлишкової електроенергії необхідно використовувати баластне навантаження. Частку відновлюваної енергії зазвичай приймають лише на рівні 50%.

Доцільність режиму паралельної роботи паливного та відновлюваного елемента даної системи при зростанні навантаження на дизельну генерацію через зменшення встановленої потужності установок *ВЕУ*.

Реалізація описаного режиму роботи вимагає складний алгоритм управління даним енергетичним комплексом, тобто, необхідно ввести додатково інвертор, який може працювати як незалежно, так і паралельно з мережею [10].

Як альтернатива описаній системі – інверторні *ДГ* (рис. 1.6), які володіють кращими регульовальними характеристиками та є більш економічні, враховуючи зниження витрати палива через зниження частоти обертання *ДГ* за малих навантажень.

При інтеграції установок *ВЕУ* в діючі системи електропостачання використовують шини змінного струму та, відповідно, інверторні перетворювачі частоти – перетворювачі напруги, які використовуються в складі вітрових установок, або при генерації фотоелектричними елементами.

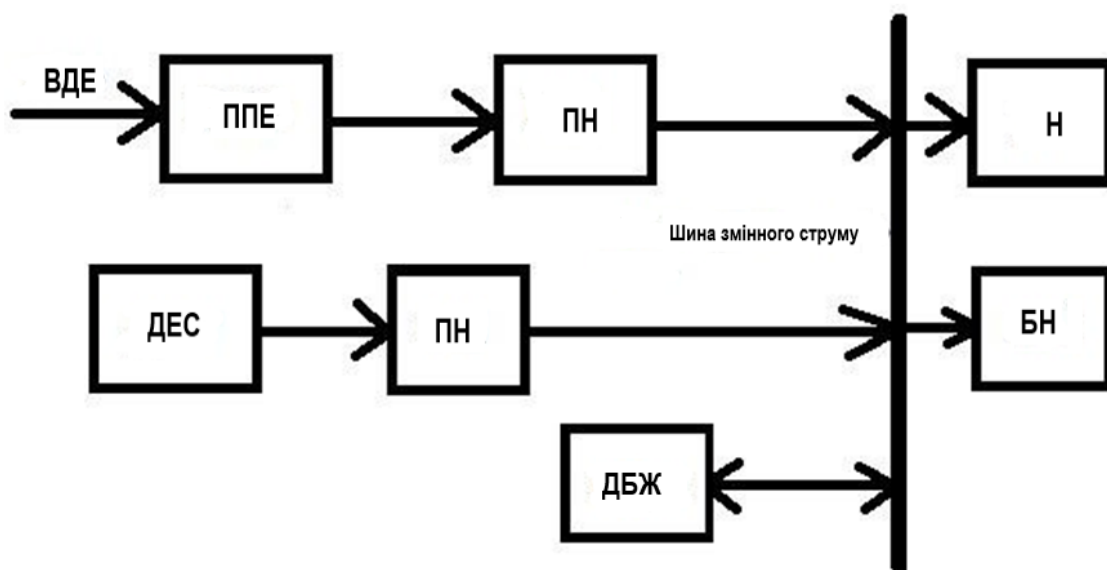


Рисунок 1.6. Гібридний енергетичний комплекс із інверторною ДГ.

Тобто, при присутності *ЦЕП* можливо застосувати комбіновану схему для резервного електропостачання приватного будинку при частих відключеннях електропостачання мережі (рисунок 1.7) [10].

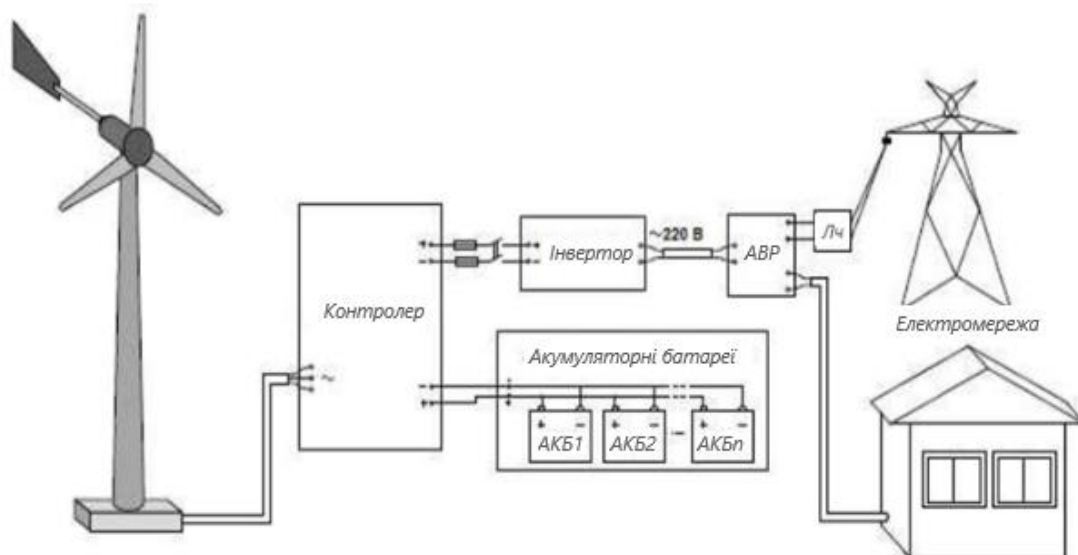


Рисунок 1.7 – Схема забезпечення електроенергією з *ЦЕП*.

Якщо напруга в мережі присутня, здійснюється заряд контролером АКБ

та передачу в ланку споживача електричну енергію мережі через вбудований стабілізатор напруги. Перемикання в режим інвертора при відімкненні мережі відбувається за 4 мс – за допомогою *АВР*, що не впливає на роботу електричного обладнання споживача.

Схема електропостачання *ВЕУ* паралельно з мережею широко застосовується в багатьох країнах [10-14]. Сучасні інвертори дозволяють працювати як з *АКБ* так і без них, генеруючи надлишки потужності в мережу.

Якщо враховувати вітровий потенціал Західного регіону, то перспективним є побудова комбінованих систем автономного електропостачання, що має свої переваги:

– можливість ввімкнення в склад будь-якої автономної енергетичної установки незалежно від встановленого силового обладнання;

– можливість програмної конфігурації системи керування під конкретний енергетичний комплекс шляхом підключення до *ПК* на момент виконання даної операції;

– ефективне використання потенціалу установок *ВДЕ* шляхом встановлення додаткових модулів для збору інформації про умови оточуючого середовища та вироблення керуючих впливів для керування енергетичними установками комплексу [11-12].

Існує альтернативний варіант спільної роботи цих *ВДЕ* на шині постійного струму (рис.1.8) [13].

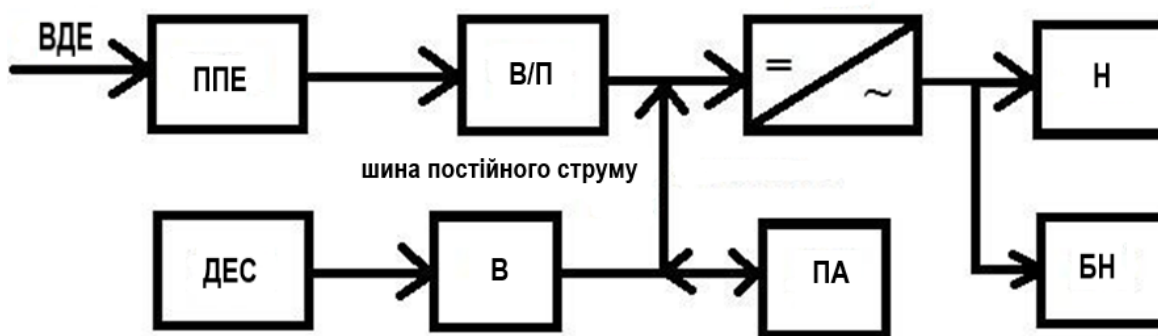


Рисунок 1.8 – Гібридний енергетичний комплекс із шиною постійного струму:

ПА – пристрій акумуляування, *В* – випрямляч.

1.3 Класифікація вітрових генераторів

Для загального випадку вітрова турбіна може бути обладнання трифазним генератором будь-якого типу. Як правило в *BEU* використовують [10]:

– асинхронні (індукційні) генератори: з короткозамкненим ротором (*SCIG*); з фазним ротором (*WRIG*); з оптичним управлінням (*OSIG*); подвійного живлення (*DFIG*).

Індукційні генератори, як комплекс пристроїв (електрична машина – силовий статичний перетворювач енергії) мають такі переваги: надійність та простота; низька вартість та стійкість в різних режимах експлуатації (наприклад, змінна частота обертання вітроколеса).

Недоліки: несинусоїдальність кривої напруги; необхідність реактивного струму намагнічування; складність системи керування.

Але слід відмітити вищу область стійкості асинхронних генераторів у порівнянні з традиційними синхронними генераторами, особливо в режимах максимального споживання реактивної потужності.

Синхронний генератор має більш високу вартість та більш складне конструктивне виконання, але, не вимагає реактивної потужності з мережі. На практиці використовують два типи синхронних генераторів: з фазним ротором; на постійних магнітах, який із-за властивості самозбудження, працює з високим коефіцієнтом потужності та високою ефективністю.

Необхідно вказати на використання в індустрії вітрових турбін інші типи генераторів: високовольтний (*HVG*); з перемиканням магнітного опору (*SRG*); з перехресним магнітним потоком (*TFG*) [10].

На вибір основних функціональних вузлів *BEU* (генератора, інвертора, *АКБ*, комутаційного обладнання та інше) не впливають три фактори:

1. Вихідна потужність (пікове навантаження) (*кВт*) визначається тільки потужністю перетворювача (інвертора) й не залежить від параметрів вітрового потоку чи ємності *АКБ*. Вказаний параметр визначає максимальну кількість

пристроїв, одночасно ввімкнених в систему електропостачання, тобто, неможливо споживати потужності більше, ніж потужність інвертора. На практиці, для підвищення потужності можливе використання декількох інверторів [10].

2. Час неперервної роботи за відсутністю вітру чи слабому вітрові визначається ємністю *АКБ* та залежить від загальної потужності ввімкнених пристроїв. При необхідності встановлюються *АКБ* з більшою ємністю.

3. Швидкість заряду *АКБ* залежить від потужності генератора. Також цей показник залежить від висоти щогли, вітроенергетичного потенціалу регіону та рельєфу місцевості. При слабкому вітрові та/або постійного споживання енергії споживачами – вибирати генератор більшої потужності.

1.4 Аналіз дизель-генераторів

В якості первинного двигуна дизель-генератора використовують *ДВЗ* при роботі якого виконується механічна робота при виділенні теплоти. Механічна робота на валу двигуна використовується для генерування електроенергії генератором [10, 14].

Області використання *ДГ*: резервне, допоміжне, основне джерело на виробництвах; спільна робота в системі *ЦЕП*.

Основні властивості *ДГ*: відносно низька вартість генерованої енергії; швидка окупність; великий ресурс щодо використання.

Необхідністю застосування *ДГ* є:

- резервування потужностей при відімкненій системі електричної мережі (аварійний режим);
- можливість генерування енергії паралельно з електричною мережею (допоміжний режим) для забезпечення балансу в системі.

Основні (середні) показники, що характеризують *ДГ* представлені в таблиці 1.1 [10].

Таблиця 1.1 – Основні характеристики ДГ.

Показник	Діапазон значення
Питомий ефективний розхід палива, $кг/(кВт \cdot год)$	0.184 – 0.220
Питомий розхід масла, $г/(кВт \cdot год)$	0.30 – 1.40
ККД (без утилізації теплоти)	0.39 – 0.47
ККД (з утилізацією теплоти)	0.70 – 0.80
Напруга, (кВт)	0.4 – 13
Діапазон робочих режимів, % від P_n	10 – 110
Ресурс напрацювання (не менше), тис. год.	10 – 60
Термін служби двигуна (не менше), тис. год.	150 – 300
Затрати на ремонт, % від вартості	5 – 20
Рівень шуму (відстань 1 м) (не більше), Дб	85

1.5 Висновки до першого розділу

На основі проведеного аналізу особливостей автономної роботи вітроенергетичної установки та побудови систем комбінованого енергопостачання для здійснення досліджень режимів роботи на основі математичного моделювання необхідно:

- провести аналіз вітроенергетичного потенціалу Тернопільської області для оцінки діапазону зміни швидкості вітрового потоку;
- на основі проведеного розрахунку навантажень приватного домогосподарства здійснити вибір елементів автономного енергетичного комплексу;
- здійснити побудову математичної моделі та її елементів для дослідження оцінки стійкості при різних режимах роботи;
- провести обчислювальні експерименти роботи комбінованої вітроенергетичної установки при різних значеннях швидкості вітрового потоку та потужності навантаження й здійснити аналіз отриманих результатів моделювання.

Для дослідження вибираємо вітроенергетичну установку з синхронним генератором на постійних магнітах, а в якості альтернативного джерела живлення прийнято рішення застосувати дизель-генератор.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

ПРОЕКТУВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1 Оцінка вітроенергетичного потенціалу Тернопільської області

Для вибору технічного обладнання та локалізації місця встановлення *ВЕСУ* необхідно знати просторовий та часовий розподіл вітроенергетичного потенціалу (*ВЕП*) Тернопільської області.

Дані для проведення розрахунку взято з джерела [15], де проведені метеорологічні виміри в містах Тернопільської області: м. Бережани; м. Тернопіль; м. Чортків; м. Кременець.

Об'єкт для дослідження проектується в передмісті м. Тернополя, тому дані, щодо середньорічних та щодобових параметрів вітрового потоку будемо проводити для значень точки – м. Тернопіль.

Для вибору обладнання вітроенергетики критичним є володіння реальними «стійкими значеннями» (тривалий період часу) просторового розподілу потенціалу вітру.

Вітроенергетичний потенціал, ($Вт/м^2$) [10, 15]:

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot v^3, \quad (2.1)$$

де ρ – густина повітря, для *ВЕСУ* $\rho = 1.226 \text{ кг/м}^3$;

v – модуль швидкості вітру, який в більшості випадків задається як усереднене значення щільності розподілу функції $f(v)$ за часом [11]:

$$\bar{P} = \frac{1}{2 \cdot T} \cdot \rho \cdot \int_0^T v^3 dt, \quad (2.2)$$

де T – період усереднення.

При отриманні дискретних в часовому просторі вимірів для оцінки *ВЕП* [10]:

$$\bar{P} = \frac{1}{2 \cdot T} \cdot \rho \cdot \int_0^T v^3 dt \approx \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^N v_i^3, \quad (2.3)$$

де N – кількість вимірів в проміжку $[0, T]$.

Для розрахунку швидкості вітру (P) дані отримуємо на основі вимірів на метеостанціях. Вимірювання вітрових характеристик на метеостанціях – 8 разів на добу з 10-хвилинним усередненням; на аерологічних – 2–4 рази на добу в визначених точках простору.

Для означення вітрового режиму регіону використовували дані з таблиць *ТМС* архіву ЦГО України: швидкість, напрям вітру, за висоти флюгера ~ 10 м (над земною поверхнею) для чотирьох метеостанцій (Тернопіль, Чортків, Бережани, Кременець). Контроль якості для розрахунків статистичних показників вітрового режиму – перевищення допустимих граничних меж [15].

Означимо, що для всієї вибірки даних на кожній станції, для проведення аналізу, застосовували модель випадкової величини. Для аналізу даних означеного часового діапазону немає необхідності використовувати більш складнішу модель випадкової функції [15].

Порядок проведення аналізу даних [15]:

1. Аналіз сукупності даних для кожної станції виду емпіричної щільності розподілу ймовірності. Побудовані залежності розподілу: за модулем швидкості вітру; за напрямом (роз и вітрів), представлені на рисунках 2.1 та 2.2.

Максимум розподілу (станція Тернопіль) припадає на значення 2 м/с, діапазон швидкості вітру за критерієм частот/ймовірність – $2-6$ м/с.

З аналізу рози вітрів впливає перевага в регіоні вітрів західного та південного напрямків; вітер володіє вищою потужністю у північно-східній частині регіону.

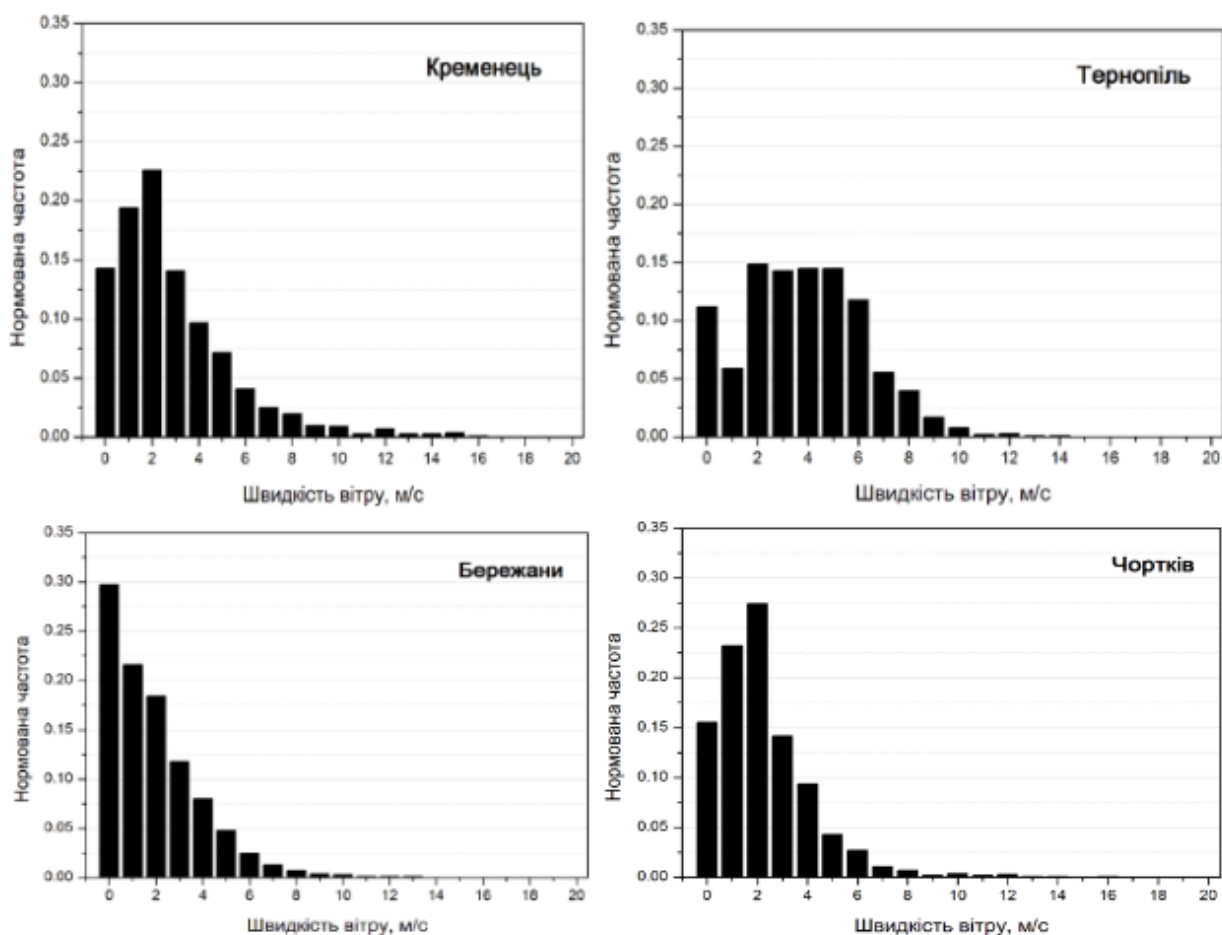


Рисунок 2.1 – Розподіл швидкості вітру [15].

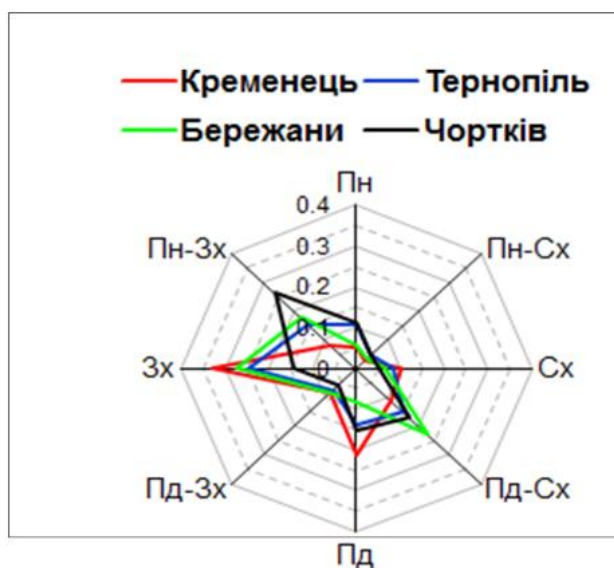


Рисунок 2.2 – Розподіл напрямку вітру (роза вітрів) на станціях Тернопільської області [15].

2. Визначення основних статистичних показників – таблиця 2.1. На станції Тернопіль розрахункова середня швидкість вітру 3.83 м/с , максимальна – 20.0 м/с .

Таблиця 2.1 – Статистичні показники характеру розподілу вітру на станціях проведення дослідження [15].

Станція	Середня швидкість, м/с	Середнє квадратичне відхилення м/с	Максимальне значення, м/с
Кременець	2.87	2.68	22.0
Тернопіль	3.83	2.46	20.0
Бережани	1.92	2.04	21.0
Чортків	2.25	2.00	2.04

3. Дослідження річної зміни вітру за строковими значеннями в кожному місяці (модель сукупності 12 випадкових величин). Означено залежність амплітуди річних змін від зміни швидкостей. На станції Тернопіль амплітуда змін становить $\sim 1.5 \text{ м/с}$ (рисунок 2.3).

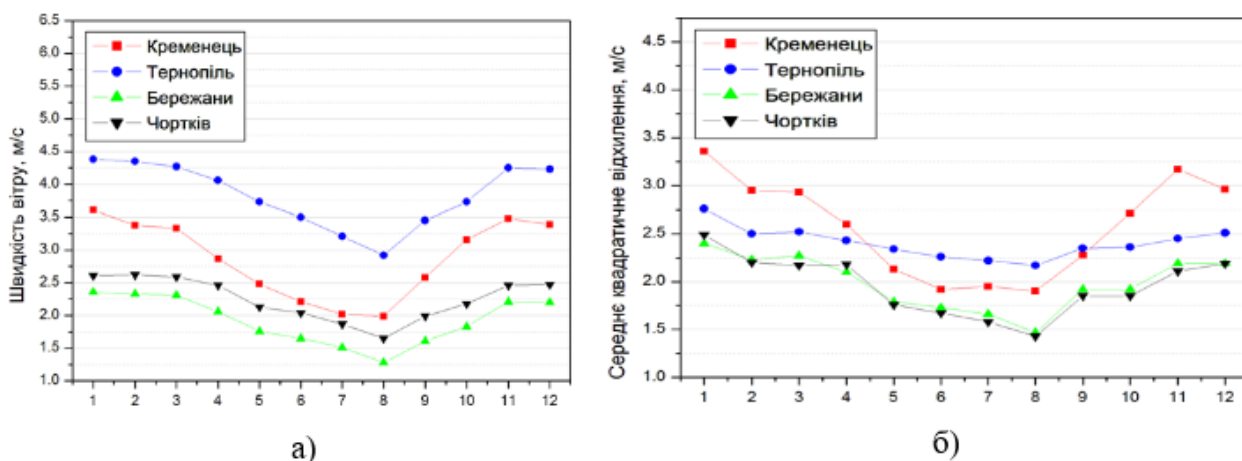


Рисунок 2.3 – Річна швидкість зміни вітру (а) та середньо-квадратичне відхилення (б) за містами регіону [15].

4. Дослідження добової швидкості зміни вітру (модель сукупності 8-ми випадкових величин за 8-ма румбами на станціях). Різниця зміни швидкостей в літній та зимовий періоди для станції Тернопіль $\sim 1.0 \text{ м/с}$, середня швидкість в діапазоні $4.5 - 4.8 \text{ м/с}$ (рисунок 2.4).

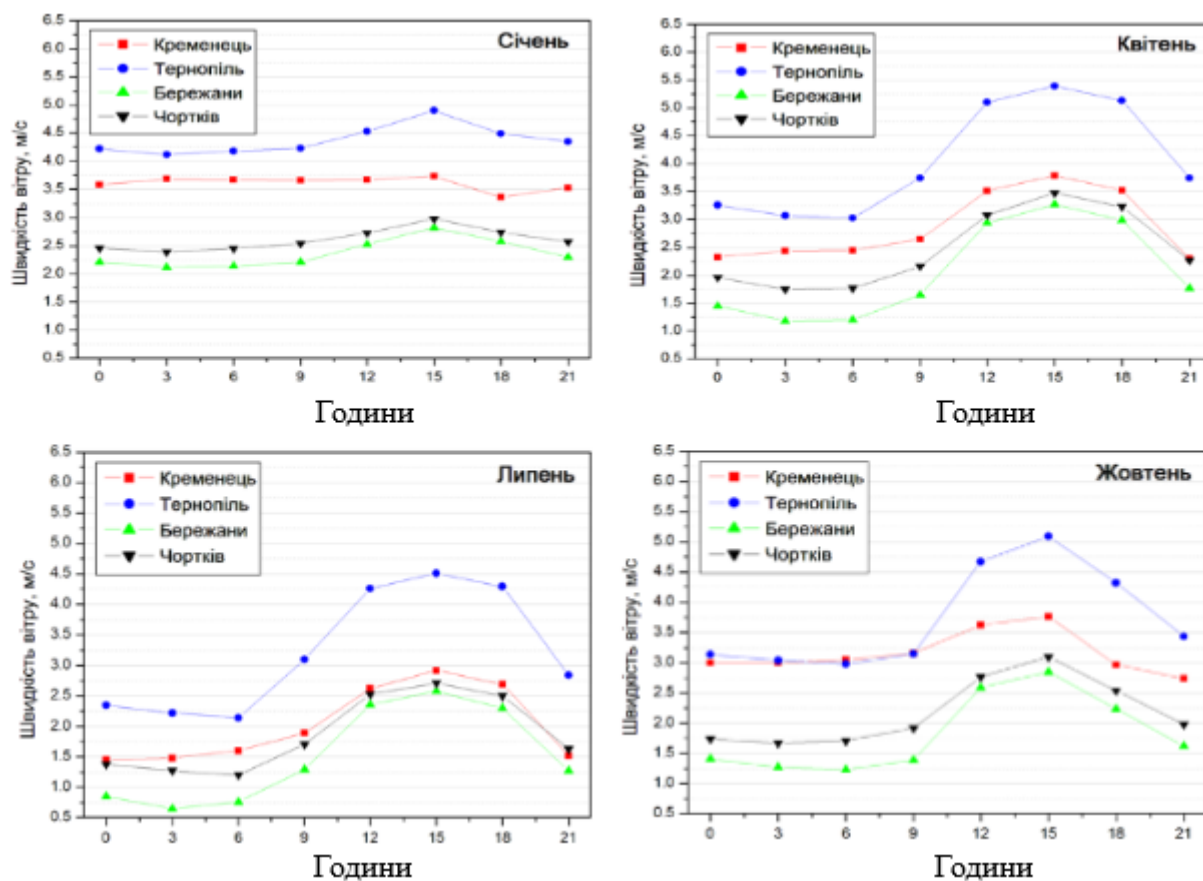


Рисунок 2.4 – Добова швидкість зміни вітру за місяцями [15].

5. Дослідження просторового розподілу вітру (за висотами). Моделювання проведено на базі метеорологічного препроцесора *CALMET* у два етапи:

1 етап. Розрахунок початкового поля вітру (екстраполяція на основі теорії Моніна – Обухова) для шару атмосфери на рівні землі (дані наземних метеорологічних станцій (*НМС*)) за модулем швидкості вітру $v(z)$ [15]:

$$v(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) + \psi_m \left(\frac{z_0}{L} \right) \right], \quad (2.4)$$

де u_* – динамічна швидкість;

k – стала Кармана, $k \approx 0.4$;

ψ_m – функція стійкості атмосфери (аналітичний вид за [10]);

L – масштаб Моніна – Обухова приймається за [10]).

2 етап. Розрахунок фінального поля вітру (у кожній інтерполяційній точці) для вертикального шару атмосфери (дані *НМС* та радіозондувань за компонентом швидкості вітру $(v_1, v_2)_{ij2}$ інтерполяційного вузла ij [15]:

$$(v_1, v_2)_{ij2} = \frac{(v_1, v_2)_{ij1} / R^2 + \sum_{k=1}^N (v_{obs}, v_{2obs})_k / R_k^2}{1/R^2 + \sum_{k=1}^N 1/R_k^2}, \quad (2.5)$$

де $(v_1, v_2)_{ij1}$ – компонента вітру за формулою (2.4) того ж;

R – ваговий коефіцієнт (задає користувач);

$(v_{obs}, v_{2obs})_k$ – значення компоненти швидкості вітру k –го вузла ;

R_k – відстань від k –ї станції до інтерполяційного вузла ij ;

N – кількість станцій (задає користувач).

Для дослідження використані дані 4 –х станцій Тернопільської області, що дозволило означити швидкість вітру в діапазоні розміщення *BEU* .

Вітроенергетичний потенціал (Wm/m^2) на різних висотах обчислений на формулами 2.4-2.5 представлено на рисунку 2.5.

Аналіз показує присутність кореляційної залежності між значеннями \bar{P} та висотами на місцевості.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що для встановлення *BEU* малої потужності в означених точках дослідження значення \bar{P} на діапазоні висот 10 – 30 м становлять 40 – 80 Wm/m^2 [15].

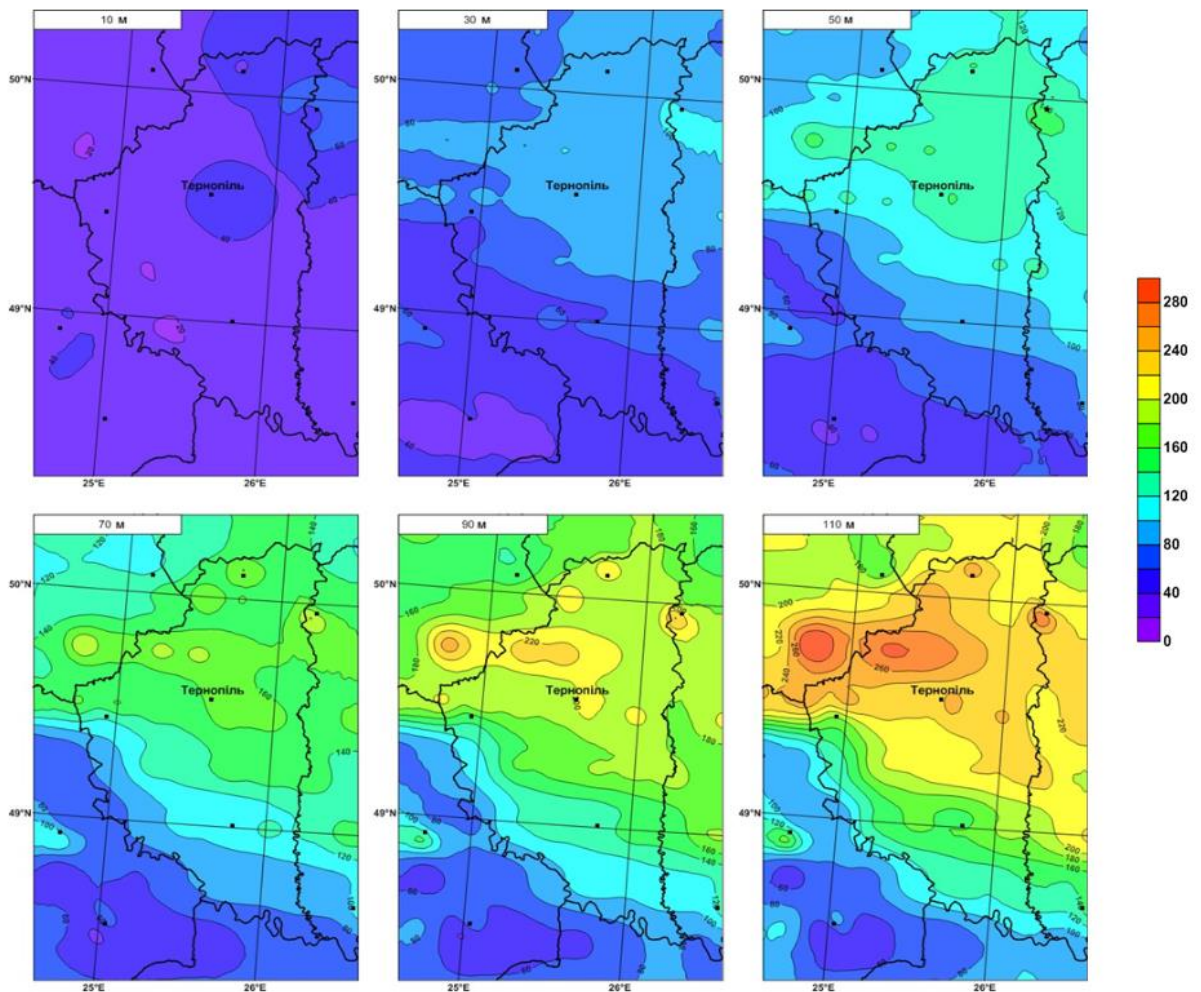


Рисунок 2.5 – Вітроенергетичний потенціал (W/m^2) Тернопільської області за висотами [15].

2.2 Розрахунок споживаної потужності

Вхідними даними для розрахунку потужності приватного споживача енергії здійснюємо за піковою потужністю з врахуванням певного ступеня ймовірності (прогнозування) у зв'язку з непередбачуваністю графіка енергозатрат.

Для розрахунку пікової потужності потрібно виявити особливості енергоспоживання кожного з електричних приймачів у певний час доби (ранок, день, вечір, ніч). Це дасть змогу обчислити максимальне споживання електроенергії [16-17].

Рівень споживання електроенергії будемо розраховувати на певній фазі доби як суму потужностей усіх функціонуючих електричних приймачів відповідно в ранкові, денні, вечірні та нічні години.

Вхідні дані щодо функціонування електричних приймачів об'єкту подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок пікової потужності

№ з/п на плані	Назва обладнання	Встановлена потужність $P_n, Вт$	Миттєва споживана потужність, $Вт$			
			Ранок	День	Вечір	Ніч
1	Посудомийна машини	1500			1500	
2	Мікрохвильова піч	1500	1500			
3	Пральна машина	500			500	
4	Телевізор	300	300		300	
5	Електрична плита	1500	1500		1500	
6	Електричний чайник	2000	2000		2000	
7	Порохотяг	650			650	
8	Лампи розжарювання	1000	1000	1000	1000	1000
9	Зарядний пристрій мобільного	4	4	4	4	4
10	Праска	1100	1100		1100	
11	Освітлювальні прилади	400	400		400	
12	Міксер	200	200		200	
13	Фен	200			200	
14	Персональний комп'ютер	50			50	
15	Холодильник	188	188	188	188	188
16	Система обігріву	300	300	300	300	300
17	Інші прилади	1000	1000	1000	1000	1000
Разом		12392	9492	2492	10892	2492

З врахуванням роботи кожного з електричних приймачів розраховуємо добове електроспоживання домогосподарством та зводимо в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахунок добової споживаної потужності

№ з/п на плані	Назва обладнання	Встановлена потужність $P_H, \text{Вт}$	Час використання, $T_i, \text{год}$				Споживання електричної енергії, $\text{Вт} \cdot \text{год}$
			Ранок 1 год.	День 10 год.	Вечір 4 год.	Ніч 8 год.	
1	Посудомийна машини	1500			0.5		750
2	Мікрохвильова піч	1500	0.2				300
3	Пральна машина	500			1.0		500
4	Телевізор	300	1.0		2		900
5	Електрична плита	1500	0.5		1.0		2250
6	Електричний чайник	2000	0.1		0.1		400
7	Порохотяг	650			0.5		325
8	Лампи розжарювання	1000	1.0	0.5	3	1.0	5500
9	Зарядний пристрій мобільного	4	0.5	0.2	1.0	0.2	7.6
10	Праска	1100	0.1		0.5		660
11	Освітлювальні прилади	400	0.3		2		920
12	Міксер	200	0.1		0.1		40
13	Фен	200			0.2		40
14	Персональний комп'ютер	50			1.0		50
15	Холодильник	188	1	10	4	8	4512
16	Система обігріву	300	1	2	2	2	2400
17	Інші прилади	1000	0.5	0.5	0.5	0.5	2000
Разом		12392	7.3	14.2	20.4	12.7	21554.6

Очевидно, що максимальна потужність, що споживається електричним обладнанням на об'єкті в вечірні години та становить: $P_{\text{ник.}} = 10892 \text{ Вт}$.

Потужність інвертора, що входить в склад вітроенергетичної установки повинна бути не менше: $P_{\text{інвер.}} > 10892 \text{ Вт}$. Приймаємо потужність інвертора:

$$P_{\text{інв.}} = 15000 \text{ Вт} = 15 \text{ кВт}.$$

Величина електричної енергії, що споживається приватним споживачем за добу становить: $E_{доб.} = 21554 \text{ Вт} \cdot \text{год}$.

На цьому значенні ми орієнтуємося при розрахунку номінальної потужності BEU та ємності акумуляторної батареї.

2.3 Вибір елементів комбінованої системи електропостачання BEU

Визначаємо номінальну потужність BEU для автономного електропостачання приватного споживача з врахуванням середньої швидкості вітру в регіоні та споживання електричної енергії [16, 17].

Виходячи із оцінки вітрового режиму за регіонами Тернопільської області, гістограмами розподілу швидкостей вітру, статистичними показниками, розподілу напрямку вітру (роза вітрів), значеннями річних та добових (усереднених) швидкостей вітру, а також вітроенергетичного потенціалу $\text{Вт}/\text{м}^2$ на висоті 10 м приймаємо:

Середньорічна швидкість вітри за висоти щогли BEU $h=12 \text{ м}$ – $V = 6,5 \text{ м/с}$.

Величина електричної енергії, що споживається на протязі одної години, складає: $E_{год} = \frac{E_{доб.}}{24} = \frac{21554.6}{24} = 898 \text{ Вт} \cdot \text{год}$.

Визначаємо номінальну потужність вітроенергетичної установки, розділивши годинну потужність електричної енергії яка рівна одній годині [16, 17]:

$$E_{год} = \frac{E_{год}}{1} = \frac{14905}{1} = 14905 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

Для покриття потужності навантаження необхідна вітро-силова установка потужністю за мінімумом 3800 Вт при швидкості 6 м/с . Виходячи із того, що чим менша потужність вітрової установки, тим при нижчій швидкості вітру

починається генерування електричної енергії вибираємо 2 *BEU* – 5 в кількості 2 шт.

Для першої ітерації приймаємо до встановлення 2 *BEU* – 5, потужність кожної при 5 м/с – 900 Вт. Сумарна потужність *BEU*:

$$2 \cdot E_{м. BEU} \geq E_{год} = 2 \cdot 500 \geq 898 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

Проводимо перевірку. Добова енергетична потужність двох *BEU*:
 $E_{доб2-BEU} = 24 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$

Це задовольняє умові: $E_{доб2-BEU} \geq E_{доб} = 24000 \text{ Вт} \geq 21554,6 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$

В процесі розрахунку вибрана вітроенергетична установка *Wind Energy* потужністю 8 кВт з такими характеристиками [16, 17]:

Діаметр вітрового колеса, (м)	5
Потужність, (кВт)	8
Номінальна швидкість вітру, (м/с)	7.5
Робоча швидкість, (м/с)	3 ~ 40
Кількість лопатей,	3
Контролер, (кВт)	<i>EnergyWind</i> 4–10
Напруга акумуляторної батареї, (В)	48

Визначення площі, яку займає *BEU*.

Визначаємо площу, яка займається безпосередньо *BEU*. Площа січення нижньої основи щогли [10]: $S_{щ} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.2^2}{4} = 0.003 \text{ м}^2$, d – діаметр труби щогли.

Діаметр розтяжок становить: $D_p = 2 \cdot h \cdot \sin(\Omega) = 2 \cdot 12 \cdot 0.5 = 12.0 \text{ м}.$ Схема місця встановлення представлено на рисунку 2.6.

Площа (S_p), яка відходить під розтяжки: $S_p = D_p^2/4 = 12^2/4 = 36 \text{ м}^2.$

Аеродинамічні параметри *BEU*.

Ротор (вітрове колесо) вітроенергетичної установки складається з ступиці та лопатей. В горизонтально-осьових конструкціях встановлюється мультиплікатор (до уваги при розрахунку не приймаємо) [16, 17].

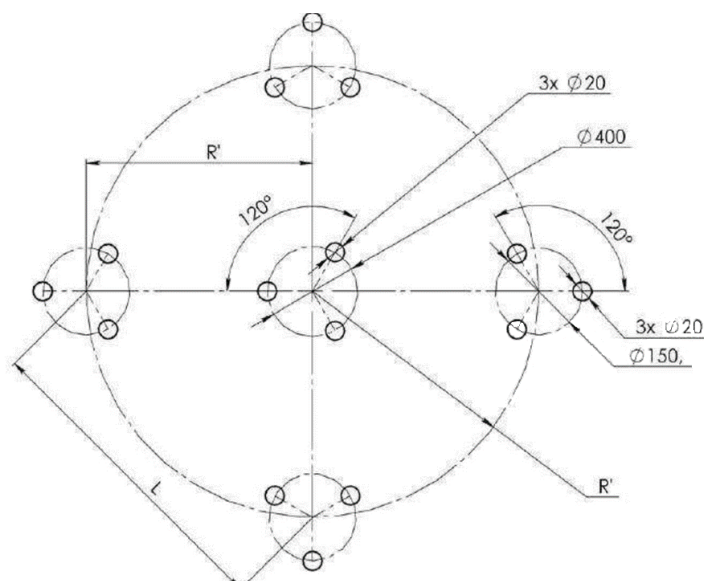


Рисунок 2.6 – Схема розміщення фундаменту під щоглу та розтяжки.

Електрична потужність (P_{el}) ВЕУ визначаємо за аеродинамічною потужністю P_A з використанням коефіцієнта енергії вітру ξ :

$$P_{el} = \xi \cdot P_A \quad (2.1)$$

де, $\xi = 0.25 \dots 0.47$; в ідеалі (без втрат) – $\xi = 0.593$; в практичному варіанті – $\xi = 0.4$:

– в ідеальному варіанті – $P_A = P_{el} / \xi = 5000 / 0.593 = 8431 \text{ Вт}$;

– на практиці – $P_A = P_{el} / \xi = 5000 / 0.4 = 12500 \text{ Вт}$.

Площа ротора становить:

$$S = \frac{2 \cdot P_A}{\rho \cdot V^3} = \frac{2 \cdot 8431}{1.225 \cdot 8^3} = 26.88 \text{ м}^2.$$

де ρ – густина повітря, приймаємо для нормальних умов $\rho = 1.225 \text{ кг/м}^3$.

На практиці площу необхідно збільшити на 33–35% з врахуванням поправки на реального значення коефіцієнта (ξ). Отримуємо:

$$S_{np.} = S \cdot 1.35 = 36.3 \text{ м}^2.$$

Знаходимо діаметр ротора:

$$D = \sqrt{4 \cdot (S/\pi)} = \sqrt{4 \cdot (36.3/3.14)} = 6.8 \text{ м}.$$

Висновок: *ВЕУ* згідно проведених розрахунків може мати конструктивне виконання.

Розрахунок параметрів лопатей ротора *ВЕУ* [16, 17].

Число лопатей ротора *ВЕУ* (n) визначає його швидкохідність (Z) – відношення лінійної швидкості краю лопаті по відношенню до швидкості вітру [16, 17]. З практики досліджень, відомо, що Z пов'язана з кількістю лопатей для горизонтально-осьових роторів:

$$n \approx 80/5^2 = 3.2 \approx 3 \text{ шт}.$$

Число лопатей заокруглюємо до найближчого значення. Схема вибору кількості лопатей в залежності від швидкохідності Z подано на рисунку 2.7.

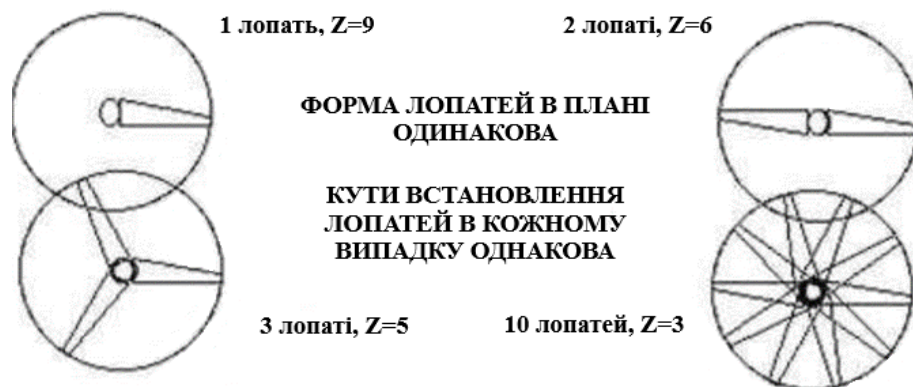


Рисунок 2.7 – Зв'язок швидкохідності та кількості лопатей.

Частота обертання ротора: за швидкості вітру 8 м/с становить:

$$\omega = \frac{60 \cdot Z \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 5 \cdot 8}{3.14 \cdot 6.8} = 112.4 \text{ об/хв}.$$

У випадку змінного значення, довжина хорди (b) (найбільша відстань між краєм та кінцем профіля лопаті) буде залежати від комля лопаті (місце закріплення ступиці лопаті):

$$b = \frac{16 \cdot \pi \cdot R \cdot (R/r)}{9 \cdot Z^2 \cdot n}, \quad (2.2)$$

величина b змінюється в межах $0 < r < R$.

Довжина змінної хорди b на 75% довжини лопаті:

$$b = \frac{16 \cdot 3.14 \cdot 3.4 \cdot (3.4/3.4 \cdot 0.75)}{9 \cdot 5^2 \cdot 3} = 0.33 \text{ м.}$$

Визначаємо довжину хорди вкінці лопаті (при радіусу ротора R):

$$b_{\kappa} = \frac{16 \cdot 3.14 \cdot 3.4 \cdot (3.4/3.4)}{9 \cdot 5^2 \cdot 3} = 0.25 \text{ м.}$$

Виконуємо перевірку лопаті за емпіричною залежністю для горизонтально-осьової BEU . Довжина хорди складає на кінці лопаті 3.8% від діаметра ротора D : $b_{\kappa} = D \cdot 3.8\% = 6.8 \cdot 0.038 = 0.25 \text{ м.}$

При критичному значенні числа Рейнольдса відбувається перехід від ламінарного до турбулентного руху. В нашому випадку число Рейнольдса:

$$R_e = \frac{V_0 \cdot b}{\nu}, \quad (2.3)$$

де V_0 – колова швидкість лопаті (лінійна швидкість точки $V_0 = M \cdot Z$) при номінальній швидкості 8 м/с;

b – характерний розмір, в нашому випадку, довжина хорди, м;

ν – кінематична в'язкість середовища, $\text{м}^2/\text{с}$.

Якщо тіло рухається в ламінарному не зжатому середовищі (густина $\rho = 1.2041 \text{ кг/м}^3$), то число Рейнольдса визначаємо з виразу для кінця лопаті (хорда b_{κ}):

$$R_e = 68500 \cdot V_0 \cdot b_{\kappa} = 68500 \cdot V \cdot Z \cdot b_{\kappa} = 68500 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 0.25 = 685000.$$

Отримане значення R_e задовольняє вимогам, які означають стійкість роботи BEU , тому що: $R_e \geq 200000$.

Для хорди лопаті $b_{0.75}$ з радіусом $r = 0.75 \cdot R$ та коловою швидкістю: $V_{0.75} = 0.75 \cdot V_0 = 0.75 \cdot V \cdot Z$:

$$R_e = 68500 \cdot V_{0.75} \cdot b_{0.75} = 68500 \cdot 0.75 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 0.33 = 678150.$$

Отримане значення відповідає умовам.

Довжину лопаті вибираємо виходячи з міцності компонентів та мінімізації впливу індуктивного опору: $1.5 \cdot R > L_{\text{лоп.}} > 4 \cdot b$.

Приймаємо: $L = R = D/2 = 3.4$ м, що задовольняє умову.

Настановний кут лопаті (β) змінний за всією довжиною, бо залежить від кута напливу потоку $\psi = \beta + \alpha$ (α – кут під яким потік вливає на лопать). На практиці, профілі лопатей мають високі аеродинамічні якості при $\alpha = 5^\circ$. Це значення беремо на початку розрахунків.

Настановний кут будь-якої точки лопаті залежить від відстані r , а в нашому випадку, кінець лопаті $r = R$:

$$\beta = \arctg\left(\frac{2 \cdot R}{3 \cdot r \cdot Z}\right) - \alpha = \arctg\left(\frac{2 \cdot 3.4}{3 \cdot 3.4 \cdot 5}\right) - 5 = -4.87^\circ,$$

Відповідно, при $r = 0.75 \cdot R$, настановний кут лопаті:

$$\beta = \arctg\left(\frac{2 \cdot 3.4}{3 \cdot 0.75 \cdot 3.4 \cdot 5}\right) - 5 = \arctg(0.17) - 5 = -4.82^\circ.$$

Зрозуміло, що лопать повинна мати скрутку за довжиною для оптимального значення настановного кута в кожній точці.

Таблиця 2.4 – Розраховані параметри *BEU*

Швидкохідність Z , (модулі)	Число лопатей, n , шт	Номинальна частота обертання, ω , об/хв	Довжина хорди (кінець), m	Довжина хорди ($0.75R$), m	Довжина лопаті, $L_{\text{лоп.}}$, м	Настановний кут β , град.
5	3	112.4	0.25	0.33	3.4	4.87

Визначення потужності інвертора [16, 17].

При виборі інвертора виходимо з позиції вартості. На практиці, перша група інверторів (дорогих) забезпечує синусоїдальну вихідну потужність (важливо для комутаційного обладнання); друга група інверторів забезпечує

вихідну напругу у формі сигналу прямокутного (трапецеїдального). Для приватного споживача з пристроями загального (побутового) призначення достатньо сигнал спрощеної форми. Згідно розрахованих значень пікова потужність становить: $P_{пик.} = 10892 \text{ Вт}$. Тоді потужність інвертора повинна бути: $P_{инв.} > 10892 \text{ Вт}$.

Приймаємо $P_{инв.} = 15000 \text{ Вт} = 15 \text{ кВт}$.

Сумарна потужність споживачів, які під'єднуються до інвертора не повинні перевищувати номінальну потужність. Крім цього, при під'єднанні до інвертора *ВЕС* різного типу навантаження (характер навантаження) необхідно виконувати умову: спочатку підключаємо індуктивне навантаження з самим більшим струмом запуску, в кінці – малопотужні споживачі з активною складовою.

Розрахунок ємності акумуляторної батареї [16, 17].

Для функціонування *ВЕС* під час генерації електричної енергії необхідно її миттєве споживання системою електроспоживання. В іншому випадку електроенергію необхідно запасати для покриття короточасних піків електроспоживання, або накопичувати при малому завантаженні в системі.

Для виконання вказаної функції використовуємо акумуляторну батарею (*АКБ*). Розрахунки необхідної ємності *АКБ* проводимо за умови необхідності запасати електроенергію яка рівна половині добового споживання:

$$E_{АКБ} = E_{доб} / 2 = 21554.6 / 2 = 10777.3 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

Визначаємо потужність яка споживається за одиницю часу ($T = 12 \text{ год}$):

$$P_{АКБ} = E_{АКБ} / 12 = 10777.3 / 12 = 898.1 \text{ Вт}.$$

Враховуючи значення напруги на *АКБ* ($U_{АКБ} = 48 \text{ В}$) визначаємо струм споживання:

$$I_{АКБ} = P_{АКБ} / U_{АКБ} = 898.1 / 48 = 18.7 \text{ А}.$$

Визначаємо загальну ємність *АКБ*, яка повинна бути віддана споживачу:

$$C_{AKB} = I_{AKB} \cdot T = 18.7 \cdot 12 = 224.4 \text{ A} \cdot \text{год}.$$

Щоб отримати значення реальної ємності $C_{p.AKB}$ необхідно подвоїти отримане розрахункове значення, враховуючи небажане розрядження хімічного акумулятора більше ніж на 50 % :

$$C_{p.AKB} = C_{AKB} \cdot 2 = 448.8 \text{ A} \cdot \text{год}.$$

Визначаємо ємність одиничної акумуляторної батареї C_i :

$$C_i = C_{p.AKB} / 4 = 448.8 / 4 = 112.2 \approx 120 \text{ A} \cdot \text{год}.$$

Враховуючи, що вихідна напруга АКБ 12 В, а номінальна напруга на вході регулятора – 48 В, акумулятори групуємо послідовно з: $48/12 = 4$ елемента.

2.4 Вибір дизель-генераторної установки [10]

Дизель-генераторну установку (ДГУ) вибираємо як резервне джерело електропостачання, тому для вибору потужності установки приймаємо, що ДГУ повинно забезпечувати 50 % від максимально необхідної потужності для споживача. Виходячи з графіка споживання та пікової потужності споживання $P_{\text{max.нав.}} = 10892 \text{ Вт}$. Тоді потужність ДГУ повинна бути $P_{\text{ДГУ}} > 10892/2 = 5446 \text{ Вт}$. Приймаємо $P_{\text{ДГУ}} = 6 \text{ кВт}$. Для ефективної роботи ДГУ необхідно дотримуватися вимог [10]:

- сумарна потужність агрегатів повинна бути на 25 % більша за максимальне добове навантаження: $P_{\Sigma} \geq 1.25 P_{\text{max}}$;
- для зручності обслуговування вибираємо ДГУ однакового типорозміру:
- завантаження ДГУ утримуємо в межах 25–80 % по відношенню до номінального;
- кількість ДГУ повинно бути надлишкова для забезпечення можливості виведення з роботи агрегатів для обслуговування та/або ремонту;

– умови експлуатації ДГУ повинні відповідати кліматичним умовам місцевості.

До встановлення приймаємо ДГУ типу *TCC SDG 6000EH3* [10].

Технічні характеристики ДГУ *TCC SDG 6000EH3* [10].

Потужність номінальна/максимальна, (<i>кВт</i>)	6/6.5
Напруга, (<i>В</i>)	230/400
Число фаз	3
Частота, (<i>Гц</i>)	50
Частота обертання, (<i>об/хв</i>)	3000
Тип генератора	синхронна
Варіант запуску	електростартер
Присутність автомату вводу резерву	присутній
Тип виконання	відкритий
Витрата палива при 75 % навантаження, (<i>л/год</i>)	2.8
Об'єм паливного баку, (<i>л</i>)	15
Рівень шуму, (<i>Дб</i>)	82

При проведенні моделювання необхідно володіти вхідними даними витрати ДГУ за питомими витратами палива при генеруванні $1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ електричної енергії [17]:

$$G_1 = K_{x.x} \cdot G_{\text{ном}} + (1 - K_{x.x}) \cdot G_{\text{ном}} \cdot (P_1 / P_{\text{ном}}), \quad (2.4)$$

де $G_1, G_{\text{ном}}$ – фактична та номінальна витрата палива, відповідно, *л/год*;

$P_1, P_{\text{ном}}$ – фактична та номінальна потужність ДГУ, відповідно, *кВт*;

$K_{x.x}$ – коефіцієнт, що характеризує витрату палива при роботі без навантаження, приймаємо: $K_{x.x} \approx 0.3$.

Володіючи даними стосовно питомого споживання ДГУ для різних режимів роботи та об'єму генерованої електроенергії, можна проводити розрахунок витрати палива за необхідні періоди часу:

$$E_T = G_1 \cdot W, \quad (2.5)$$

де W – енергія генерована за день/місяць/рік.

2.5 Висновки до другого розділу

Із аналізу вітрового потенціалу в локації встановлення вітроенергетичної установки зроблено висновок, що в означених точках дослідження значення \bar{P} на діапазоні висот 10–30 м становлять 40–80 Вт/м². Для проведення досліджень приймаємо діапазон зміни швидкості вітрового потоку 4.8–8.2 м/с . при номінальній (розрахунковій) швидкості вітру 7,5 м/с .

Проведений розрахунок навантажень приватного домогосподарства показав, що максимальна потужність на об'єкті становить $P_{\text{ник.}} = 10892 \text{ Вт}$.

Розраховані параметри складових вітроенергетичної установки: потужність інвертора – $P_{\text{інв.}} = 15 \text{ кВт}$; потужність ВЕУ – 8 кВт; діаметр вітрового колеса – 5 м; кількість лопатей – 5; швидкохідність – $Z = 5$; настановний кут – $\beta = 4.87 \text{ град}$. Сумарна ємність АКБ – 448.8 А·год.

Потужність дизель-генератора – 6 кВт (номінальний режим). До встановлення прийнято ДГУ типу TCC SDG 6000EH3.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОВОЇ УСТАНОВКИ

Для оцінки роботи побудованої комбінованої системи електропостачання необхідно здійснити перевірку на математичній моделі. Математичну модель створюємо на основі *MatLab Simulink* [19, 20].

Simulink – графічне середовище для проведення імітаційного моделювання, що дозволяє на основі блок-діаграм у вигляді направлених графів, здійснювати побудову динамічних моделей з нелінійними на періодичними системами.

Інтерактивне середовище *Simulink* дозволяє використовувати вбудовані бібліотеки блоків для моделювання електросилових, механічних та гідравлічних систем, а також застосовувати розвинутий модельно-орієнтований підхід при розробці систем управління, засобів цифрового зв'язку та пристроїв в реальному масштабі часу [19, 20]..

3.1 Моделювання вітроенергетичної установки

Для аналізу ефективності роботи комбінованої системи електропостачання на основі вітроустановки (*BEU*) за вхідними параметрами розрахованими в розділі 2 пояснювальної записки розроблена модель *BEU* малої потужності зі змінною швидкістю обертання [19, 20].

Для складного нелінійного об'єкта, якою є *BEU*, для детального дослідження необхідно створити складну математичну модель, яка розбита дрібні, зручні для дослідження, частини.

Створена модель *BEU* включає в себе моделі: вітрової турбіни; синхронного генератора з постійними магнітами. На моделі здійснюється

перетворення швидкості повітряних потоків за допомогою вітрового колеса через ротор обертає електричний генератор, який у свою чергу, через перетворювач живить навантаження або енергія накопичується на АКБ [19, 20]..

На вхід блоку *Wind Turbine*, значення якого подано у в.о., задається швидкість вітру в м/с, вітрове колесо видає момент двигуна у відповідності з механічною характеристикою, яка представлена на рисунку 3.1. Для перетворення в в.о. використовуються коефіцієнти: T_m – номінальний момент; w_n – номінальна швидкість ротора. З механічної характеристики можна зробити висновок, що при певних значеннях швидкості вітру та частоті обертання досягається максимальна потужність с. Генератор, в залежності від навантаження збільшує (за малих навантажень) або зменшує (за великих навантажень) швидкість обертання ротора. При зміні швидкості ротора змінюється момент, який видає вітрове колесо. Таким чином, виконуючи керування навантаженням генератора можливо переводити *BEU* в різні точки механічної характеристики □.

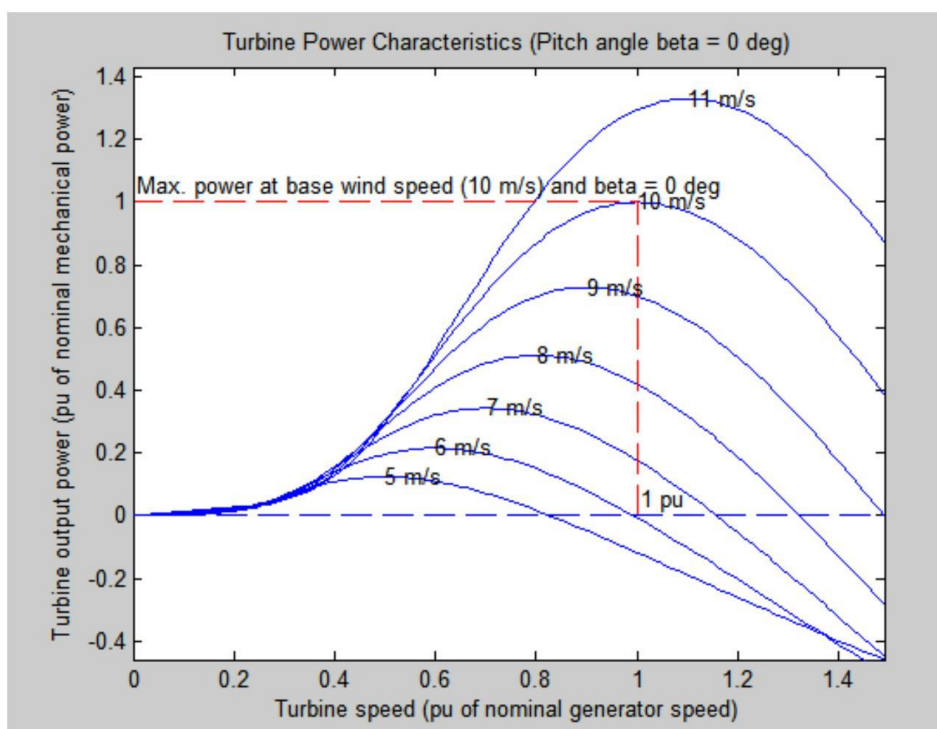


Рисунок 3.1. Механічна характеристика *BEU*.

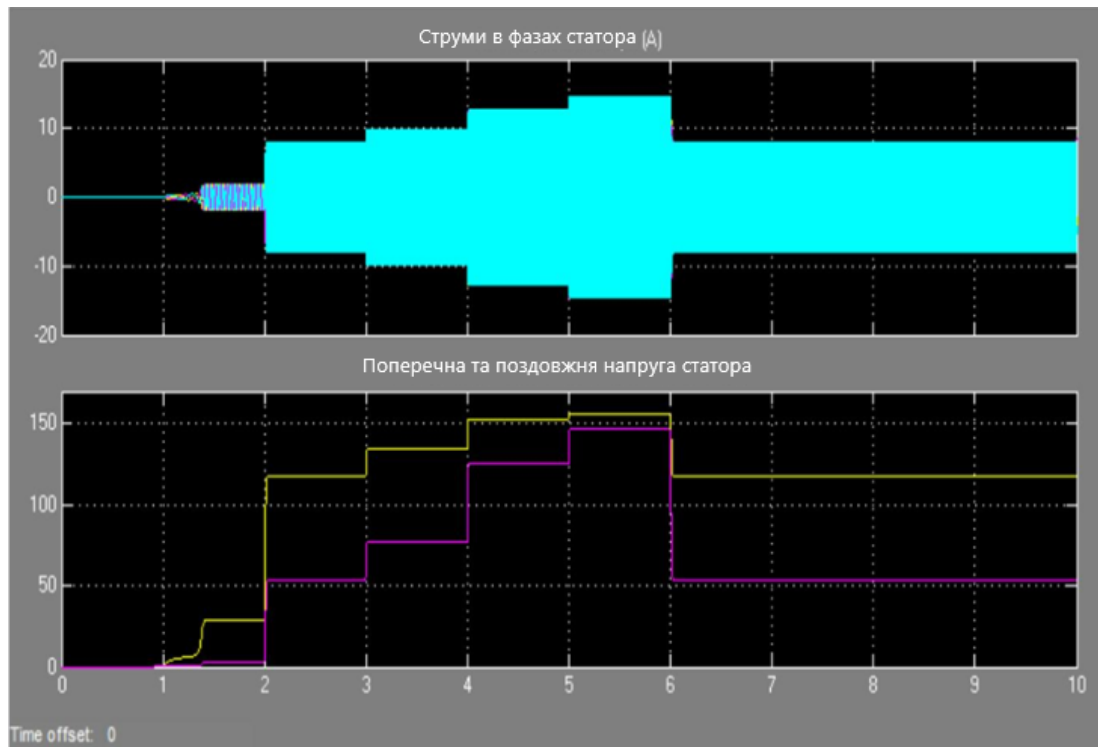


Рисунок 3.4 – Графік фазних струмів статора. Поперечної та поздовжньої напруги на статорі.

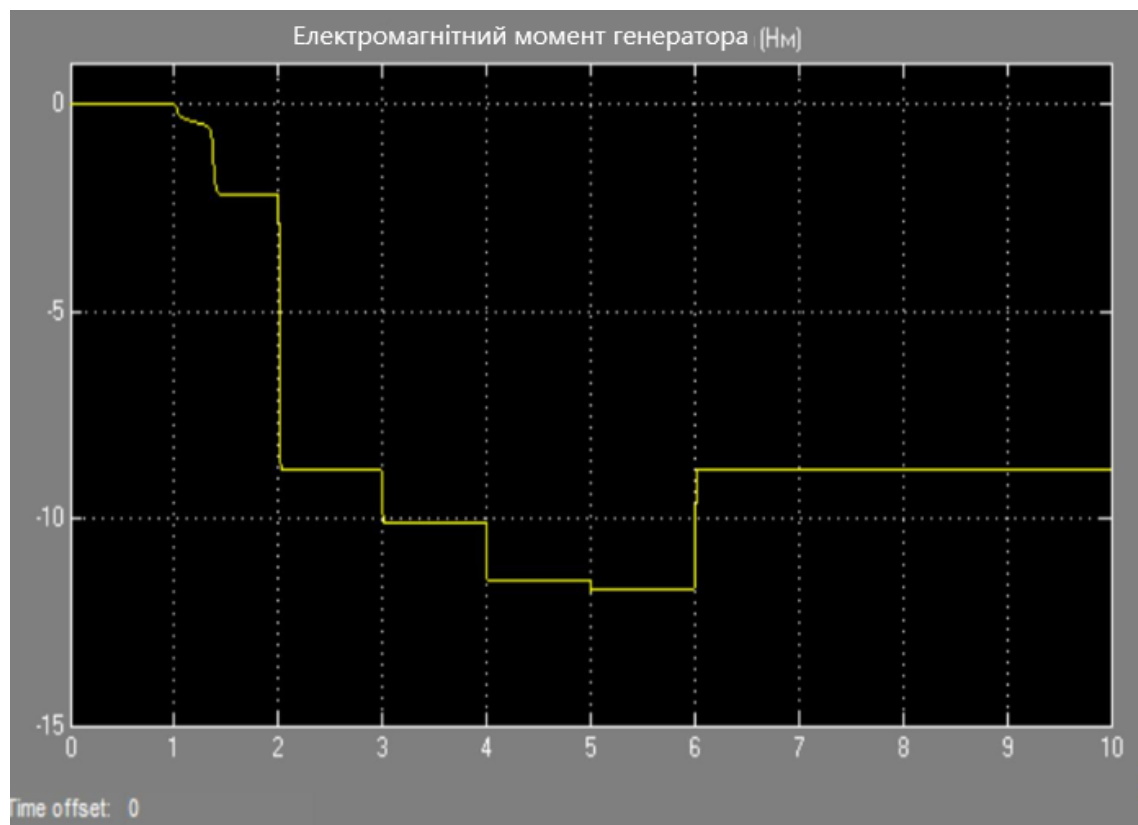


Рисунок 3.5 – Зміна електромагнітного моменту генератора.

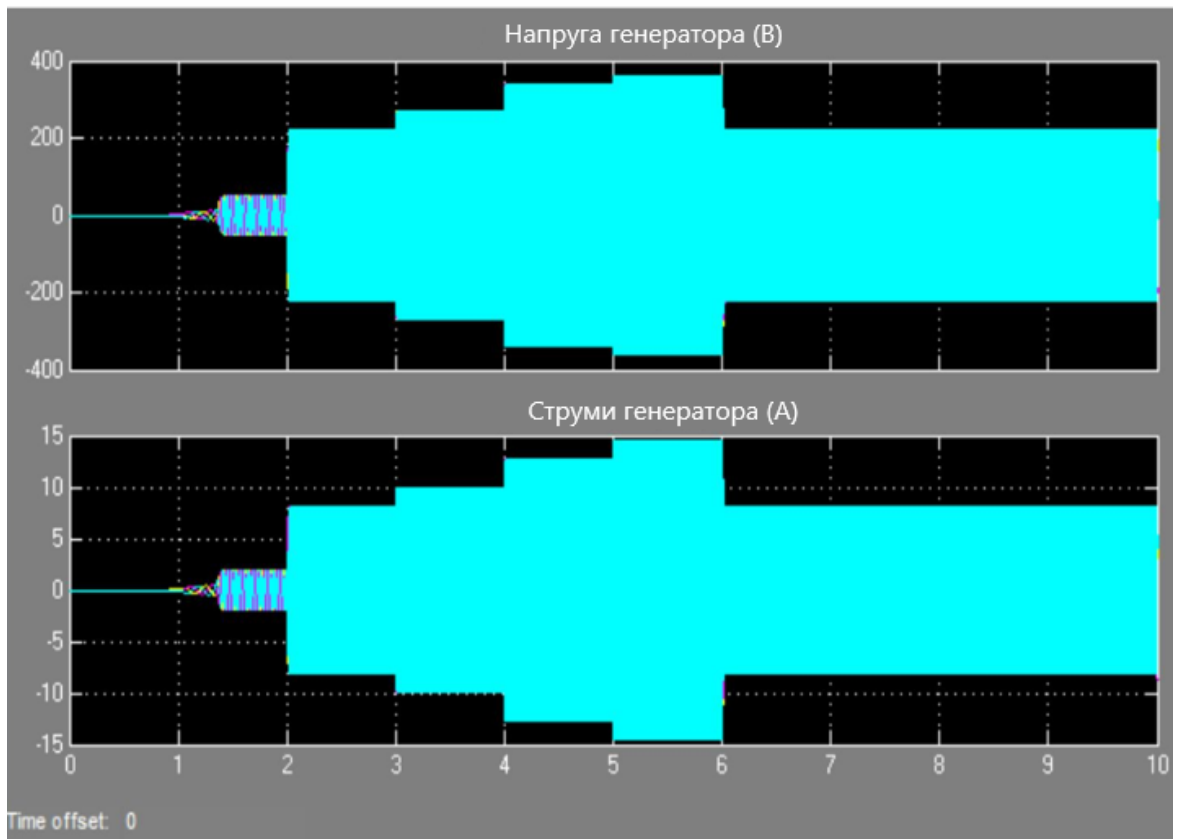


Рисунок 3.6 – Зміна напруги та струму генератора.

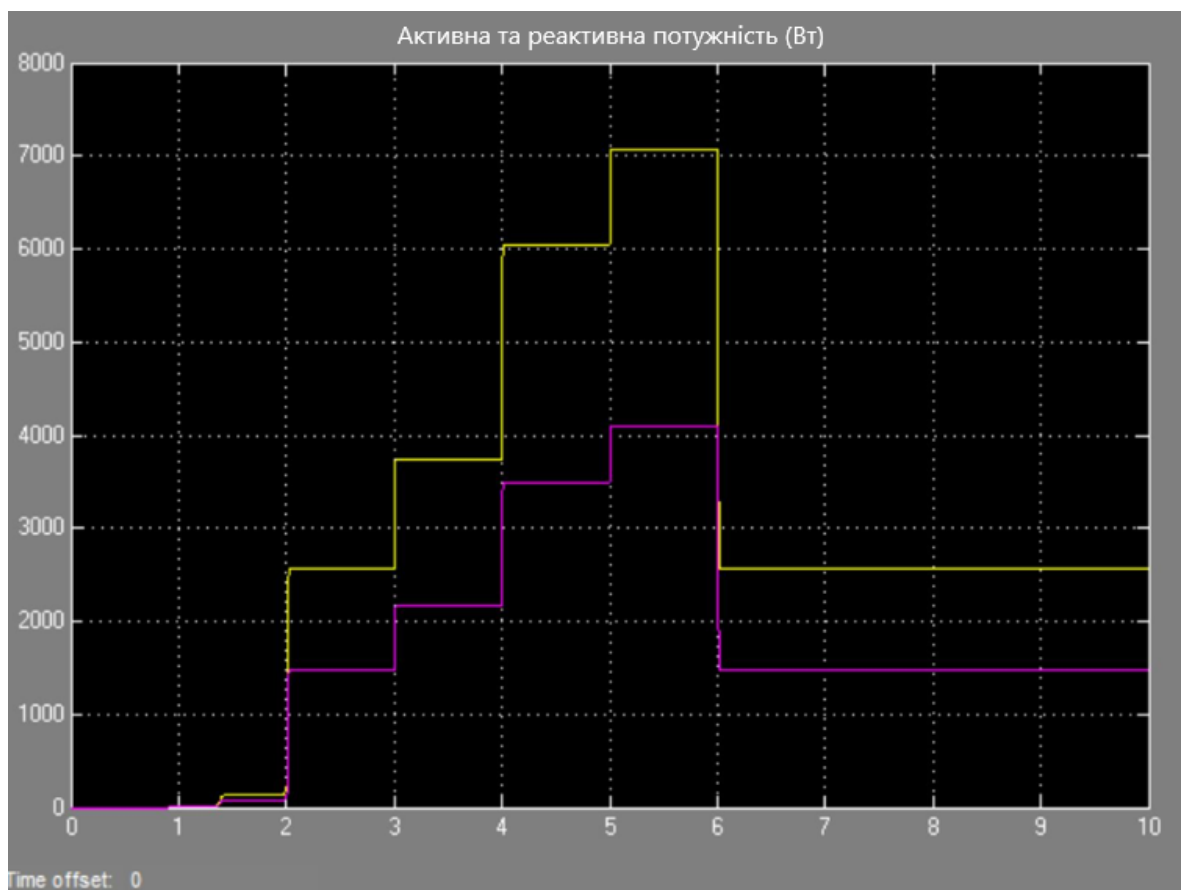


Рисунок 3.7 – Зміна активної та реактивної потужності.

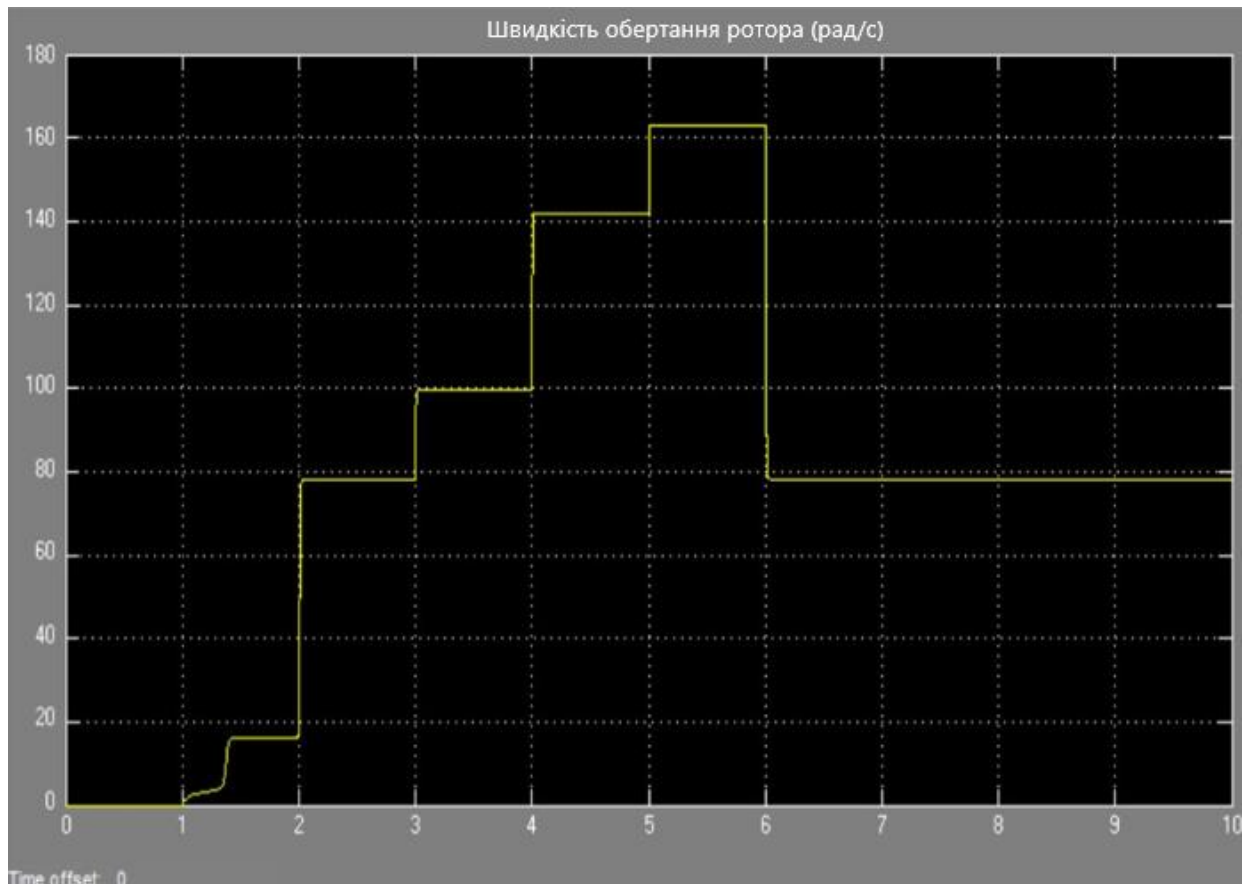


Рисунок 3.8 – Швидкість обертання ротора.

Як видно з графіків, які отримані в результаті математичного моделювання, в момент часу 1 с. швидкість вітру зростає до 2 м/с та розпочинається розгін генератора, але враховуючи низьку швидкість вітру, потужність на виході практично відсутня. В момент часу 1,3 с відбувається зростання швидкості вітру до 8 м/с – генератор розганяється та віддає потужність в мережу.

В момент часу ≈ 6 с відбувається чергове ступінчате зростання швидкості вітру до 10 м/с. Для розрахованої *BEU* ця швидкість є номінальна з видачою потужності 6 кВт для споживача або переходить на зарядження *АКБ* через некерований випрямляч.

3.2 Моделювання дизель-генератора

Дещо спрощуємо модель дизель-генератора встановленням ДГУ на постійну потужність, тобто обмежившись моделлю синхронного генератора (рисунок 3.9) [19, 20].

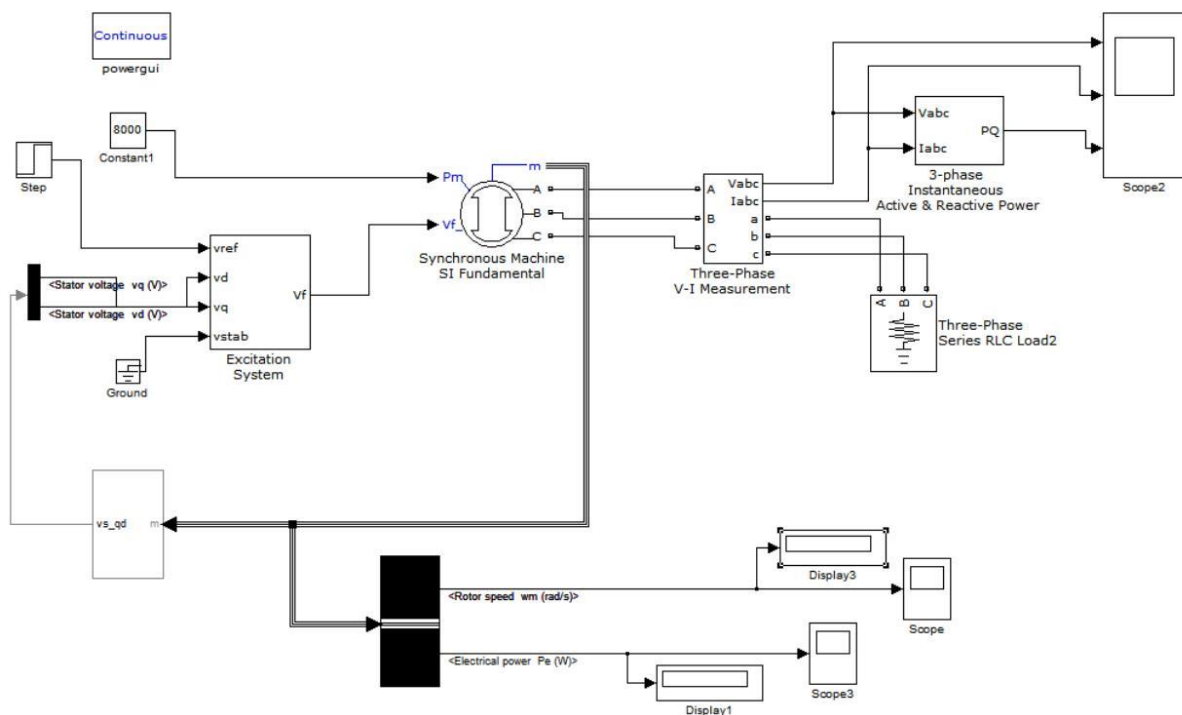


Рисунок 3.9 – Схема дизель-генератора в *Matlab* .

Головна система складової моделі «дизель-генератор» є блок *Excitation system* підсхема якого подана на рисунку 3.10 та є моделлю системи збудження для синхронної машини (*СМ*), яка працює генератором. Основними елементами системи збудження є регулятор напруги та збуджувач.

На перший вхід блоку (v_{ref}) подається необхідне значення напруги на статорі. На другий (v_d) та третій (v_q) входи подаються діючі (текучі) значення проєкцій складових напруги за осями q та d . Четвертий вхід, як правило, задається для створення контуру стабілізації потужності машини. Всі вхідні та

вихідні параметри мають розмірність *в.о.* На рисунках 3.11-3.14 подані графіки перехідних процесів в системі генератора «напряга-струм-потужність».

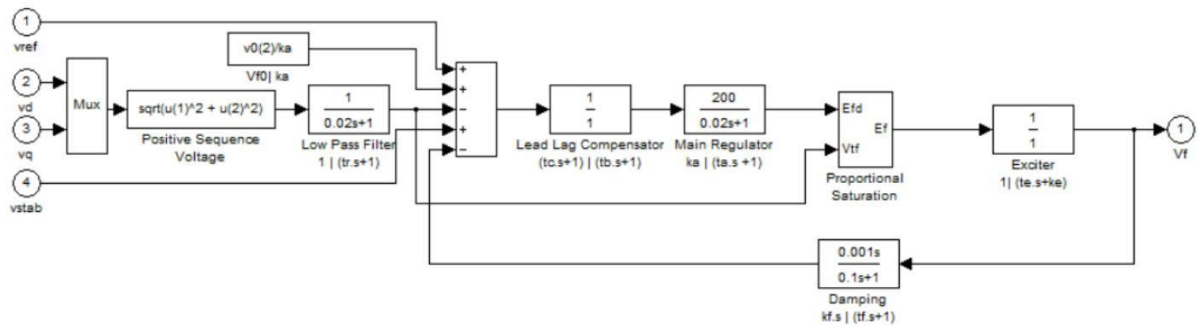


Рисунок 3.10 – Схема блоку збудження.

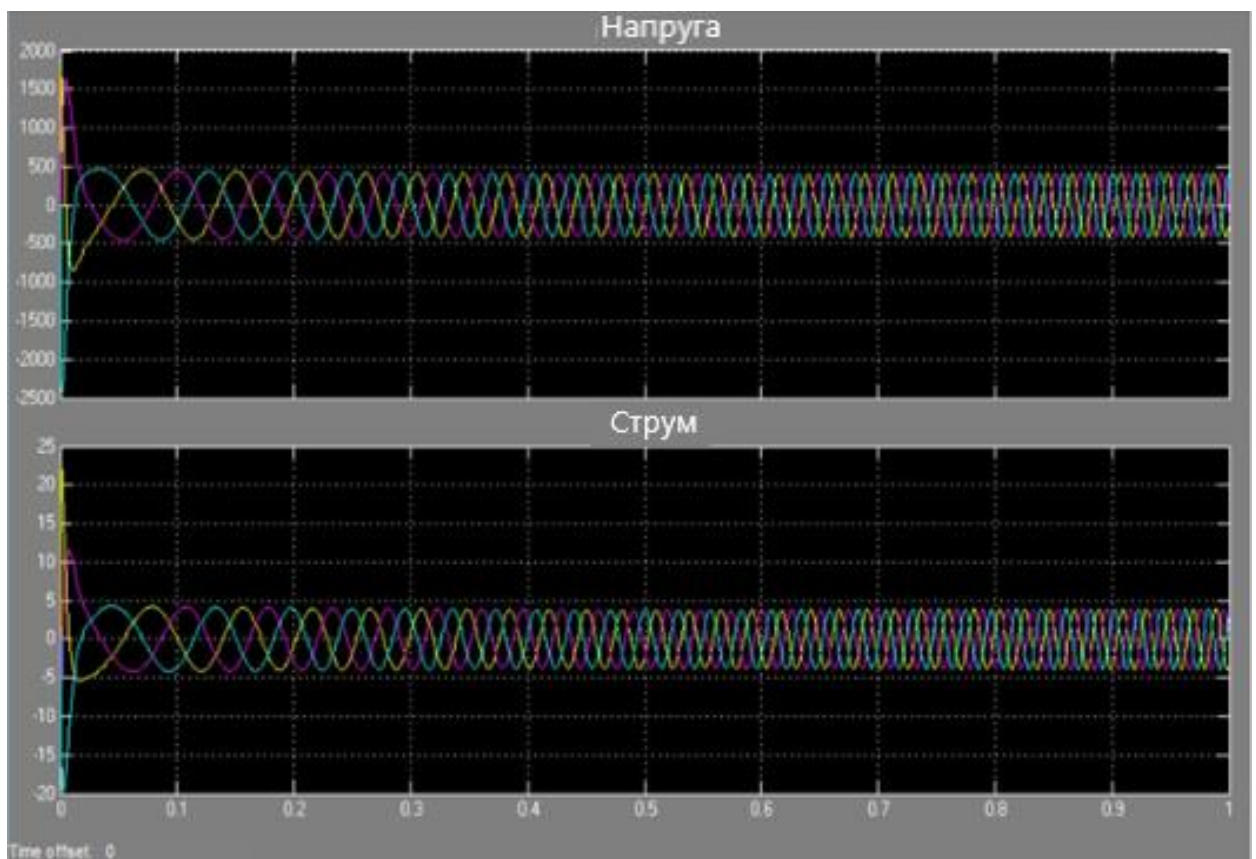


Рисунок 3.11 – Перехідні процеси лінійної напруги та струму.

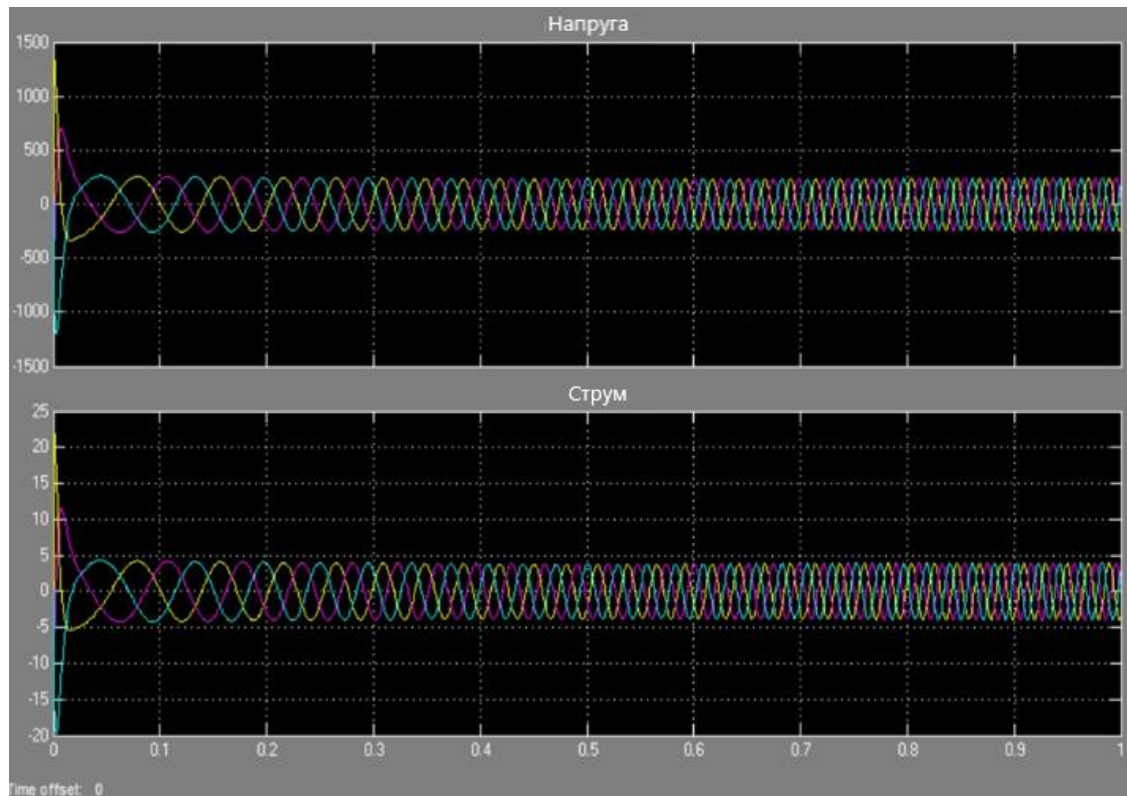


Рисунок 3.12 – Перехідні процеси фазної напруги та струму.

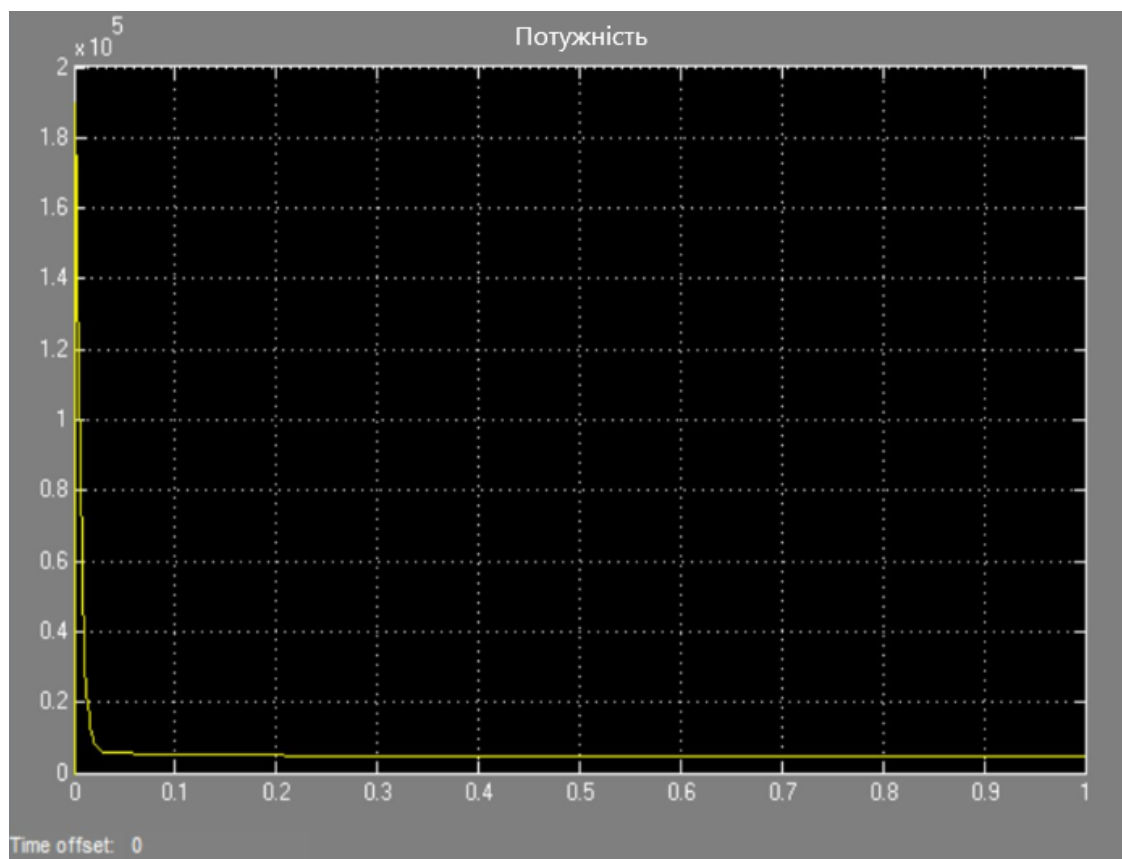


Рисунок 3.13 – Перехідний процес потужності.

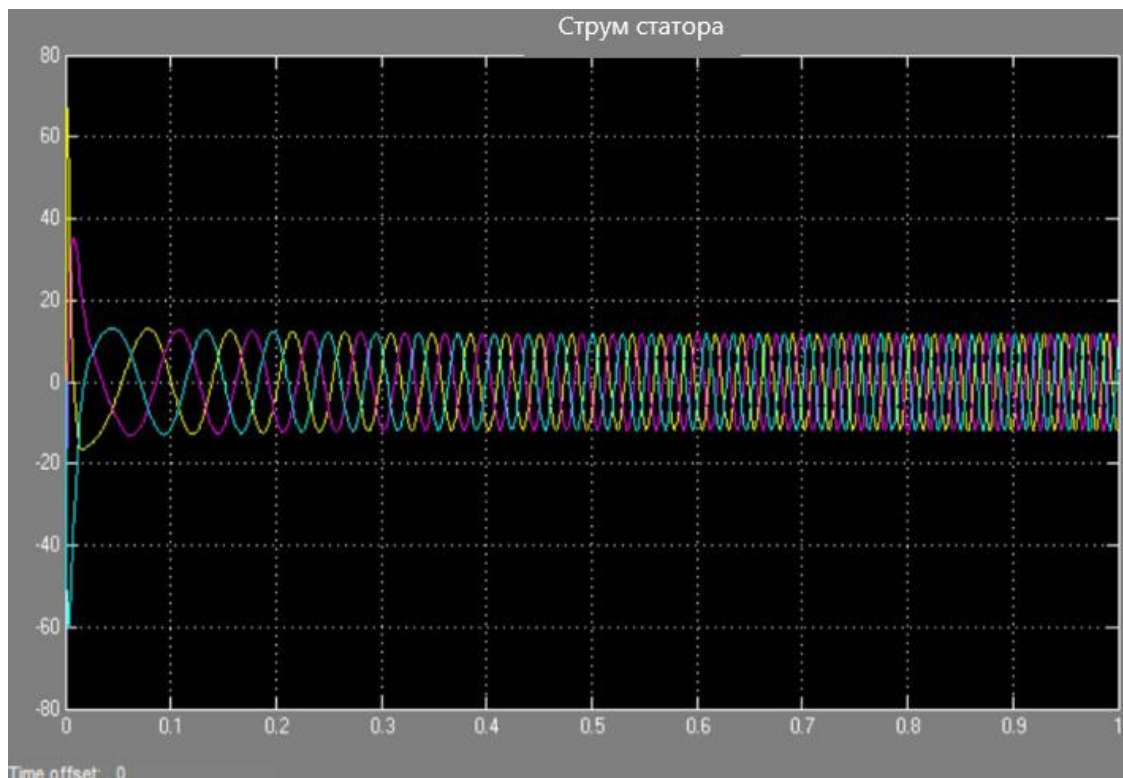


Рисунок 3.14 – Перехідні процеси струму на статорі.

3.3. Моделювання акумуляторної батареї

Проведемо моделювання батареї акумуляторів, де у відповідності до розрахунків – чотири блока ємністю BEU кожний.

Розглянемо модель пристрою балансування з комутуючим конденсатором в програмі BEU , яка представлена на 3.15 [19, 20].

Конденсаторний пристрій балансування напруги, структурна схема якого представлена на рисунку 3.16 містить послідовно з'єднані акумулятори AKB , де, до кожної пари, під'єднуються блоки «переносу заряду» через комутуючі ключі з конденсатором.

Конденсатор постійно перемикається між двома акумуляторами, переміщуючи заряд від акумулятора з більшим зарядом, до акумулятора з меншим зарядом метою – вирівнювання заряду між парами акумуляторів. Якщо врахувати (див. схему рис.3.16), що декілька блоків «переносу заряду» (

$B2...B4...$) мають зв'язок із сусідніми ланками парних акумуляторів, то «заряд» можливо передавати по всій послідовній ланці попарних акумуляторів АКБ.

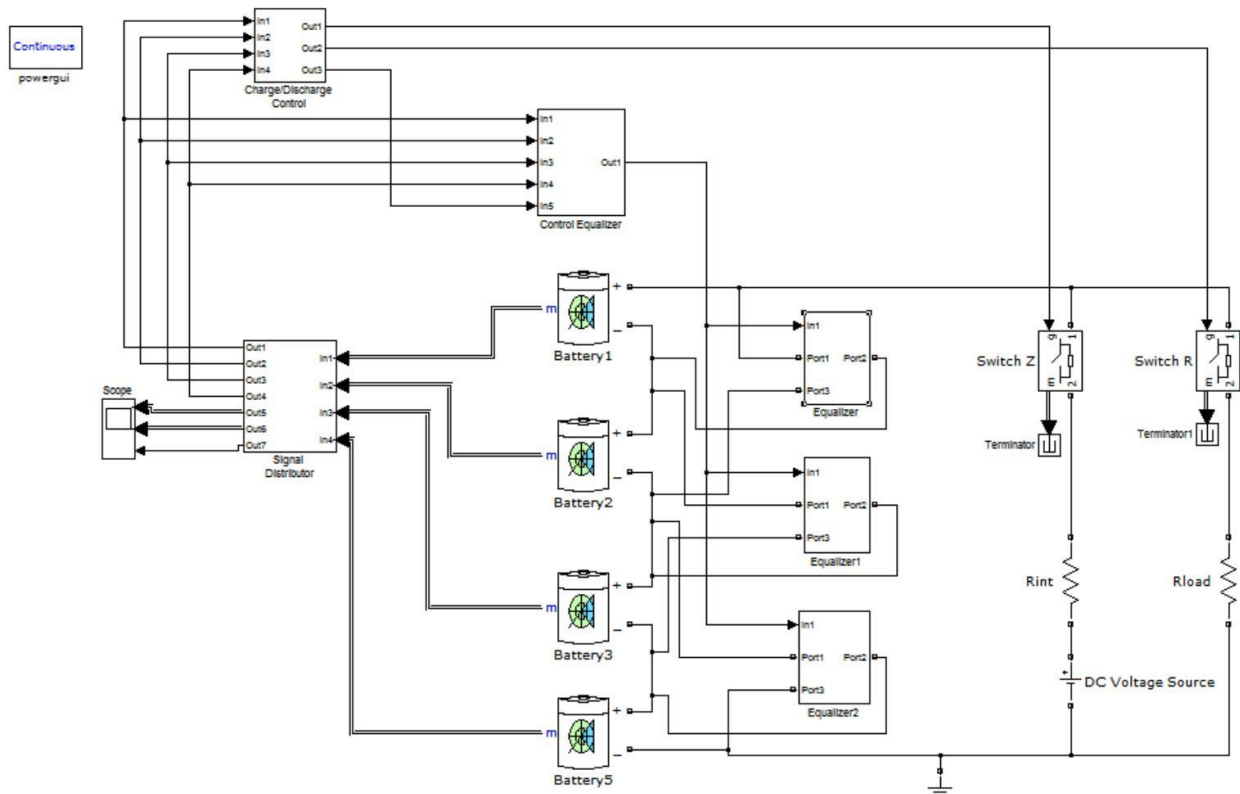


Рисунок 3.15 – Схема моделі пристрою балансування.

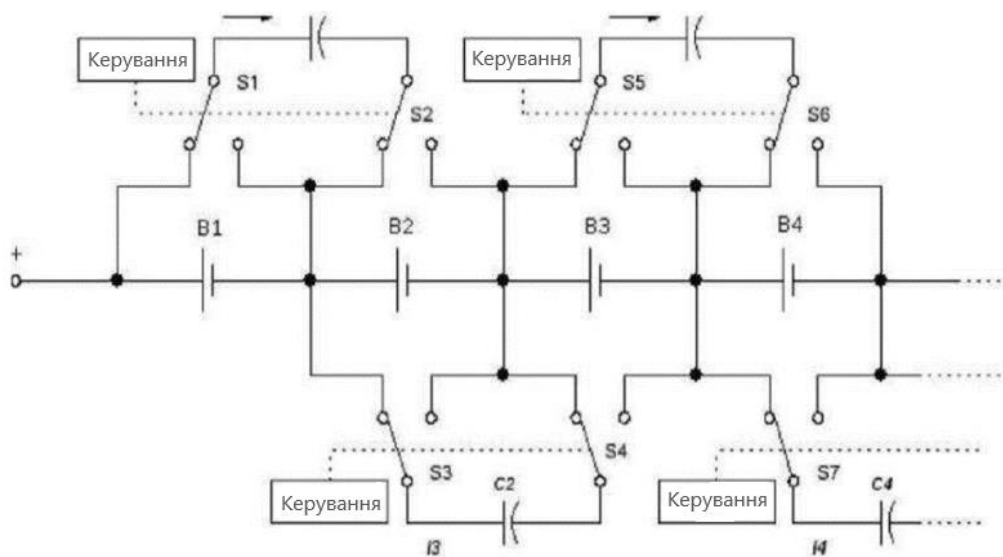


Рисунок 3.16 – Структурна схема моделі пристрою балансування [10].

Недолік схеми:

- великі періоди часу, необхідні для пошуку «найменшого заряду» в послідовній ланках АКБ;
- необхідність у великій кількості ключів: $4 \cdot (n-1)$, де n – число акумуляторів.

Але, пристрій є доволі компактний: для кожної пари АКБ, контур керування, комутаційні ключі та конденсатор – об'єднані в окремий модуль напроти акумуляторів, «заряди» яких вони зрівноважують. При необхідності в додаткових акумуляторах, в послідовну ланку АКБ встановлюють і блоки «перенесення заряду».

Моделювання проводимо задавши наступні умови:

- АКБ містить 4 акумулятори;
- тип: літій-іонний (використовуємо блок в *MatLab*);
- номінальна напруга – 12 В;
- ємність – 480 А·год.

Встановлюємо наступні значення ступеней заряду для акумуляторів:

$Battry1 = 90\%$; $Battry2 = 85\%$; $Battry3 = 80\%$; $Battry4 = 75\%$ (АКБ батарея розбалансована на 15%).

Заряд АКБ здійснюється зарядним струмом 3 А, доки напруга на одному з акумуляторів не встановиться 13.8 В. Розряд АКБ повинен здійснюватися струмом 20 А, доки напруга не знизиться на одному з акумуляторів до 10.5 В. Моделювання призупинено.

3.3.1 Ланки заряду та розряду АКБ

Заряд АКБ здійснюється від джерела постійної напруги при відкриванні ключа *Switch Z* (рисунок 3.15). Розряд АКБ здійснюється при підключенні до

навантаження відкриттям ключа *Switch R*. Блоки ключів, які не використовуються, подаються на «заглушки» – *Terminator*.

Розглянемо підсистеми схеми (рисунок 3.15) [19, 20].

1. Підсистема *Signal Distributor* (рисунок 3.17) подає сигнали від акумуляторів (інформація про напругу, $[U, B]$, та степінь заряду, $[\%]$) зі входів на осцилограф на підсистеми *Change / Discharge Control* та *Control Equalizer* через виходи з інформацією про напругу на акумуляторах. Крім цього, на виходи подається інформація про степінь заряду ($SOC, \%$) та напруги (U, B). На вихід *Out 7* (макс. різниця між ступенями заряду окремих (AKB))

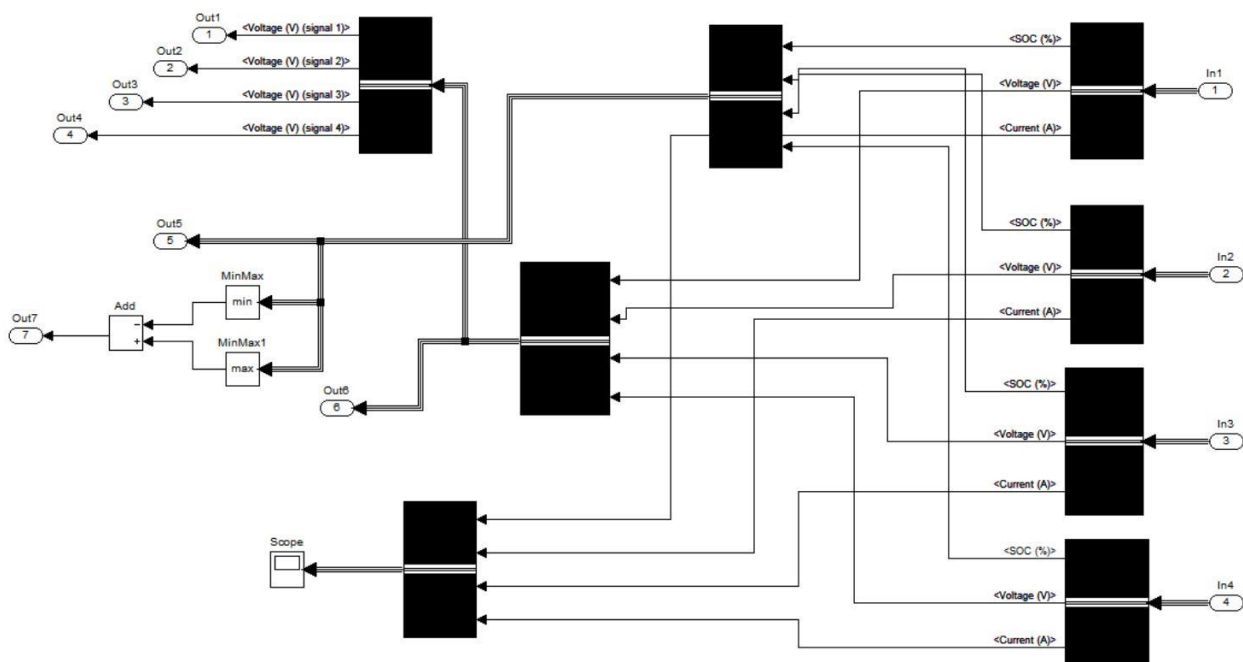


Рисунок 3.17 – Підсистема *Signal Distributor*.

2. Підсистема *Change / Discharge Control* (рисунок 3.18) [19, 20] через виходи проводить керування зарядом/розрядом *AKB* шляхом комутації ключами *Z* та *R* (закритий/відкритий при заряд/розряд та навпаки).

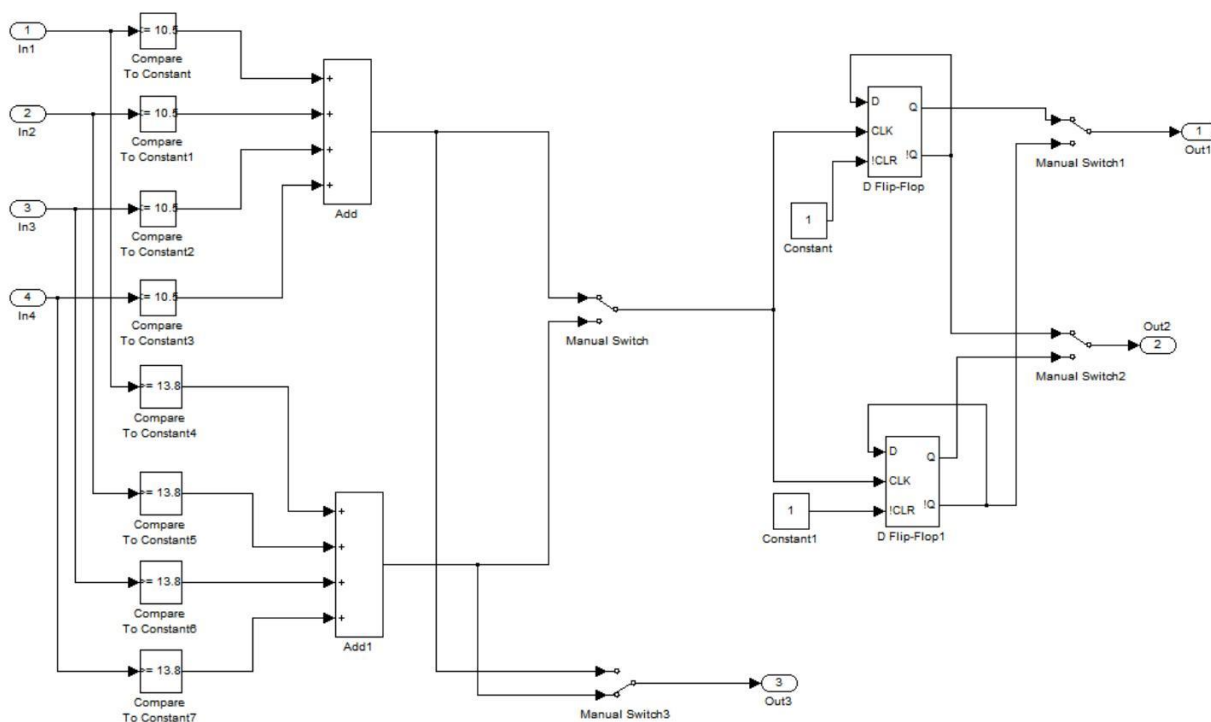
Алгоритм роботи підсистеми полягає на вимірюванні напруги *AKB* у відповідності з умовами моделювання [19, 20]:

– на виходах *Out1* та *Out2* підсистеми повинні бути сигнали рівня лог. «1» та лог. «0», відповідно;

– якщо при зарядженні, напруга на будь-якому акумуляторі перевищує допустимий рівень (13.8 В), підсистема вимикає АКБ від джерела напруги та вмикає навантаження, подаючи на виходи *Out1* та *Out2* сигнали лог. «0» та лог. «1», відповідно;

– якщо при розрядженні, напруга на будь-якому акумуляторі знизиться нижче допустимого рівня (10.5 В), примусово зупинить моделювання.

Рисунок 3.18 – Підсистема *Change / Discharge Control*.



3. Для балансування АКБ використовуємо 3 однакові підсистеми *Equalizer1*–*Equalizer3*. Аналізуємо підсистему *Equalizer1* (рисунок 3.19). В системі *Equalizer1* конденсатор *C1* через порти *Port1*–*Port3* по чергово під'єднуються до акумуляторів *Battery1* та *Battery2* (до *Battery1* через *Port1* та *Port2*; до *Battery2* через *Port2* та *Port3*). Почергове під'єднання конденсатора до відповідних ключів здійснюється ключами *Switch1*–*Switch4* за керування *D*

– тригером *Flip-Flop1*, який охопленого зворотним зв'язком. Генератор імпульсів *Pulse Generator* задає частоту комутації ключів [19, 20].

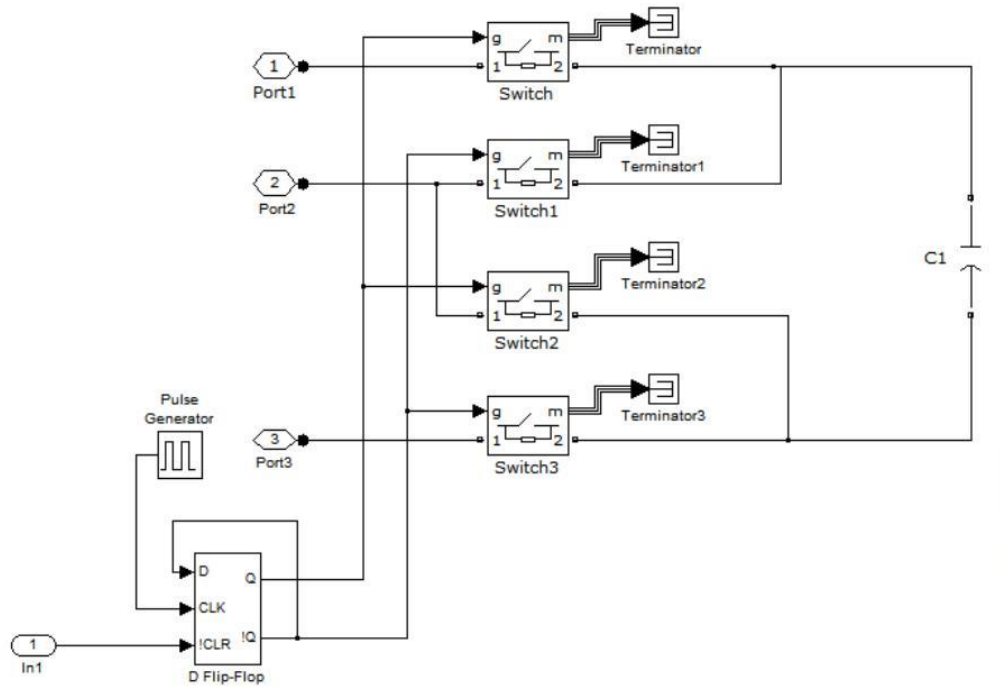


Рисунок 3.19 – Підсистема *Equalizer*.

4. Підсистема *Control Equalizer* (рисунок 3.19) обчислює різницю між максимальним та мінімальним значенням напруги на основі вхідних сигналів та порівнює з заданими межами. Якщо різниця менше заданого значення (0.1 V), то через вихід підсистеми *Control Equalizer* вимикає підсистеми *Equalizer1–Equalizer3*.

Робота схеми здійснюється тільки за сигналами на вхід від підсистеми *Change / Discharge Control* в моменти закінчення заряду/розряду АКБ (враховуючи нелінійну залежність АКБ від степені заряду, значення величини максимальна). Таким чином, підсистема забезпечує ввімкнення/вимкнення підсистем *Equalizer1–Equalizer3* тільки в моменти досягнення максимальних

значень. Підсистема керування балансом *Control Equalizer* в *MatLab* приведена на рисунку 3.20 [19, 20].

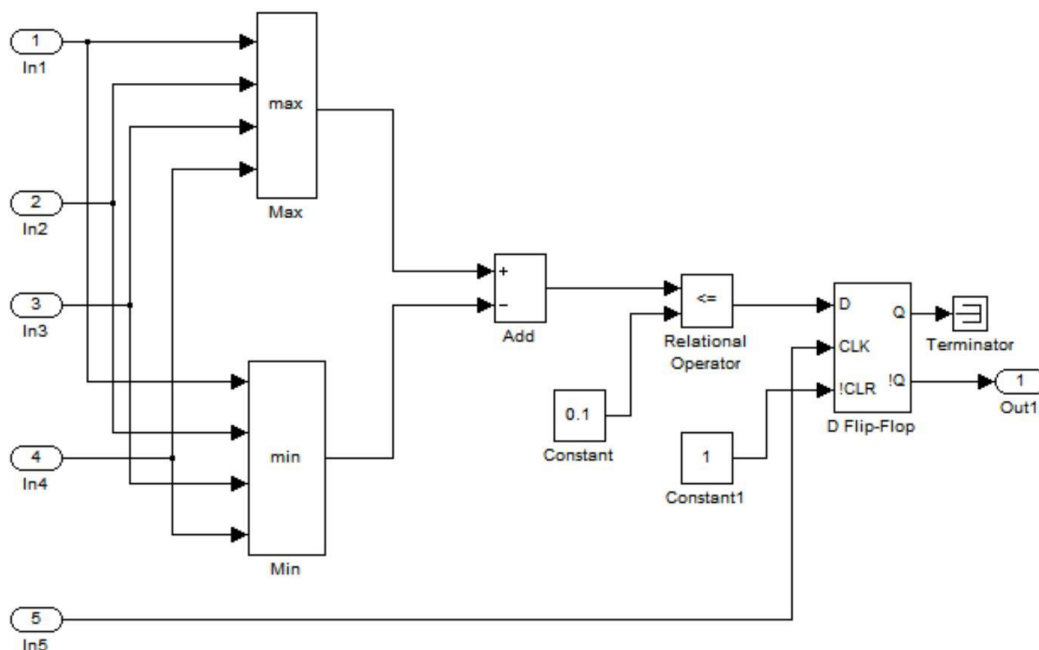


Рисунок 3.20 – Підсистема *Control Equalizer*.

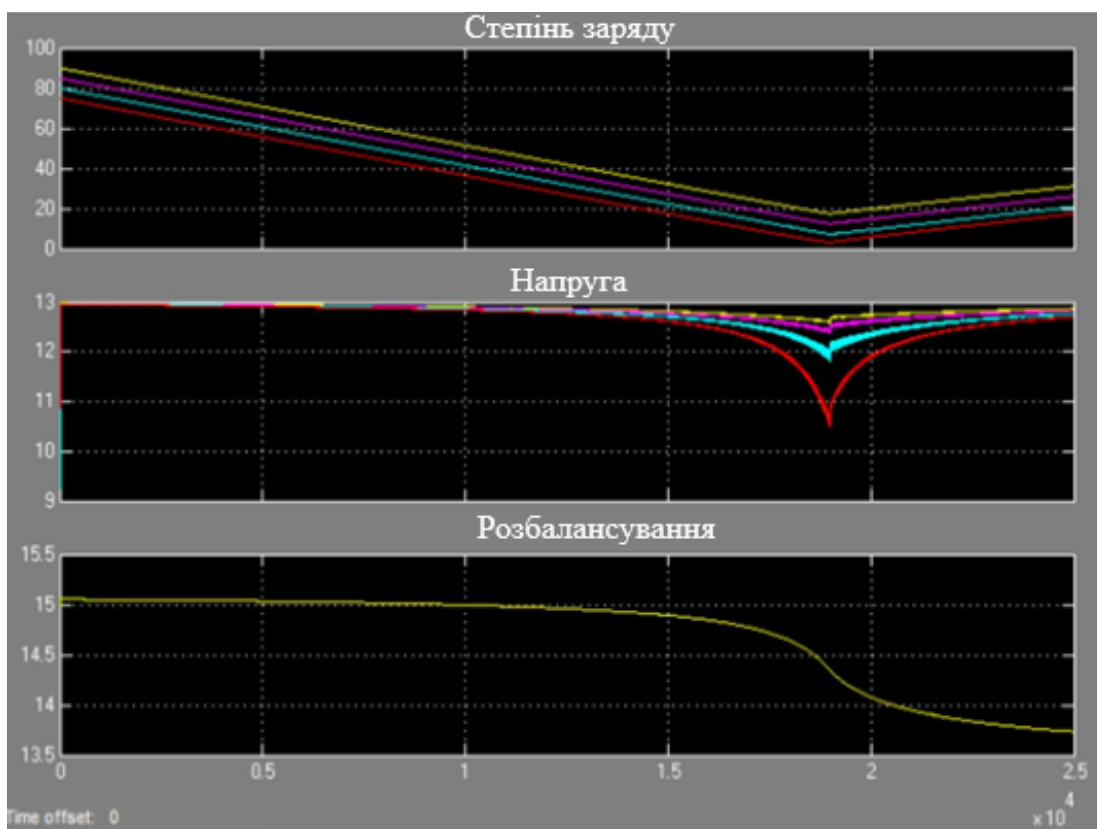


Рисунок 3.21 – Результати моделювання при розряді АКБ.

Результати моделювання заряду/розряду *АКБ* наведені на рисунках 3.21–3.23.

Як видно з осцилограми на рисунку 3.21, час розряду *АКБ* до моменту коли напруга на одному з акумуляторів (*Battery4*) досягла 10.5 В , становить 19000 сек. (5.27 години). За цей проміжок часу величина розбалансування знизилась з 15% до 14.3% .

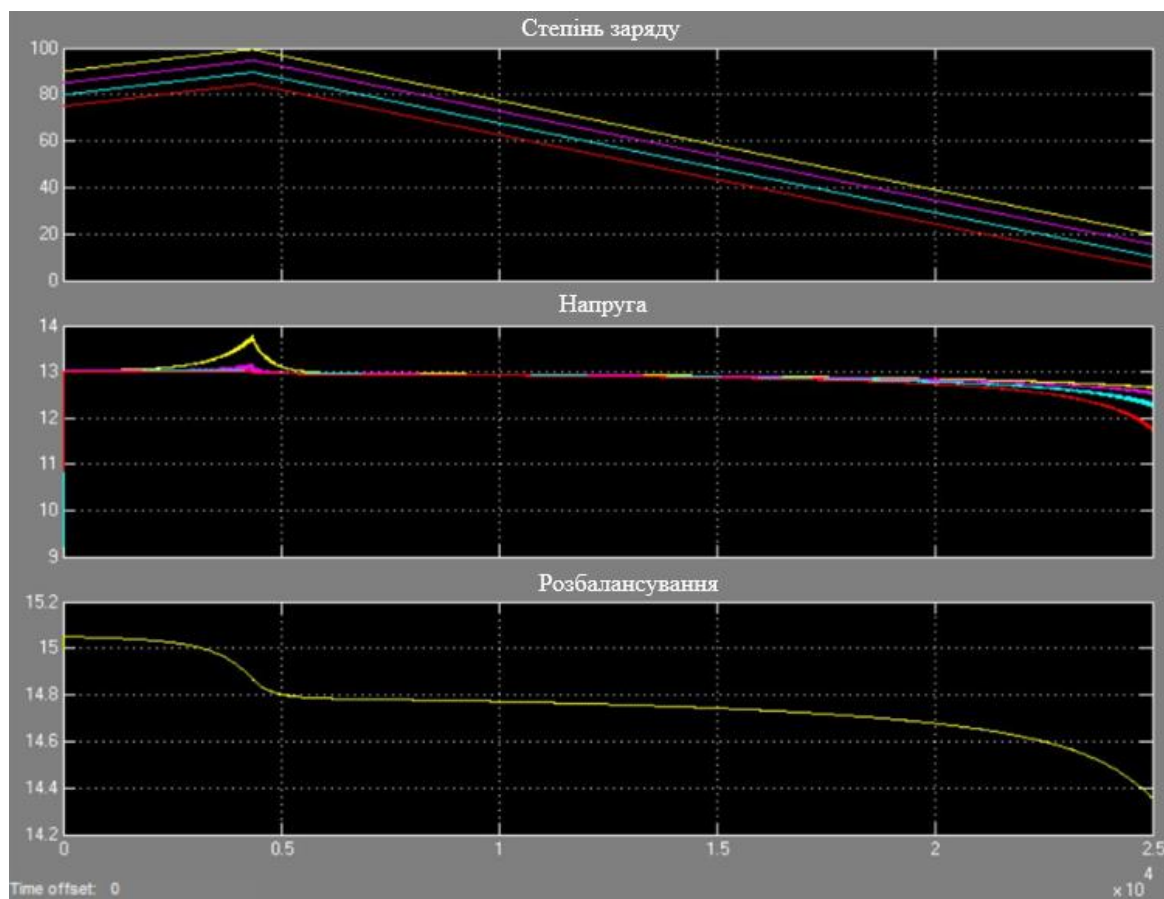


Рисунок 3.22 – Результати моделювання при заряді *АКБ*.

Як видно з осцилограми на рисунку 3.22, час заряду *АКБ* до моменту коли напруга на одному з акумуляторів (*Battery1*) досягла 13.8 В , становить 4368 сек. (1.21 години). За цей проміжок часу величина розбалансування знизилась з 15% до 14.3% .

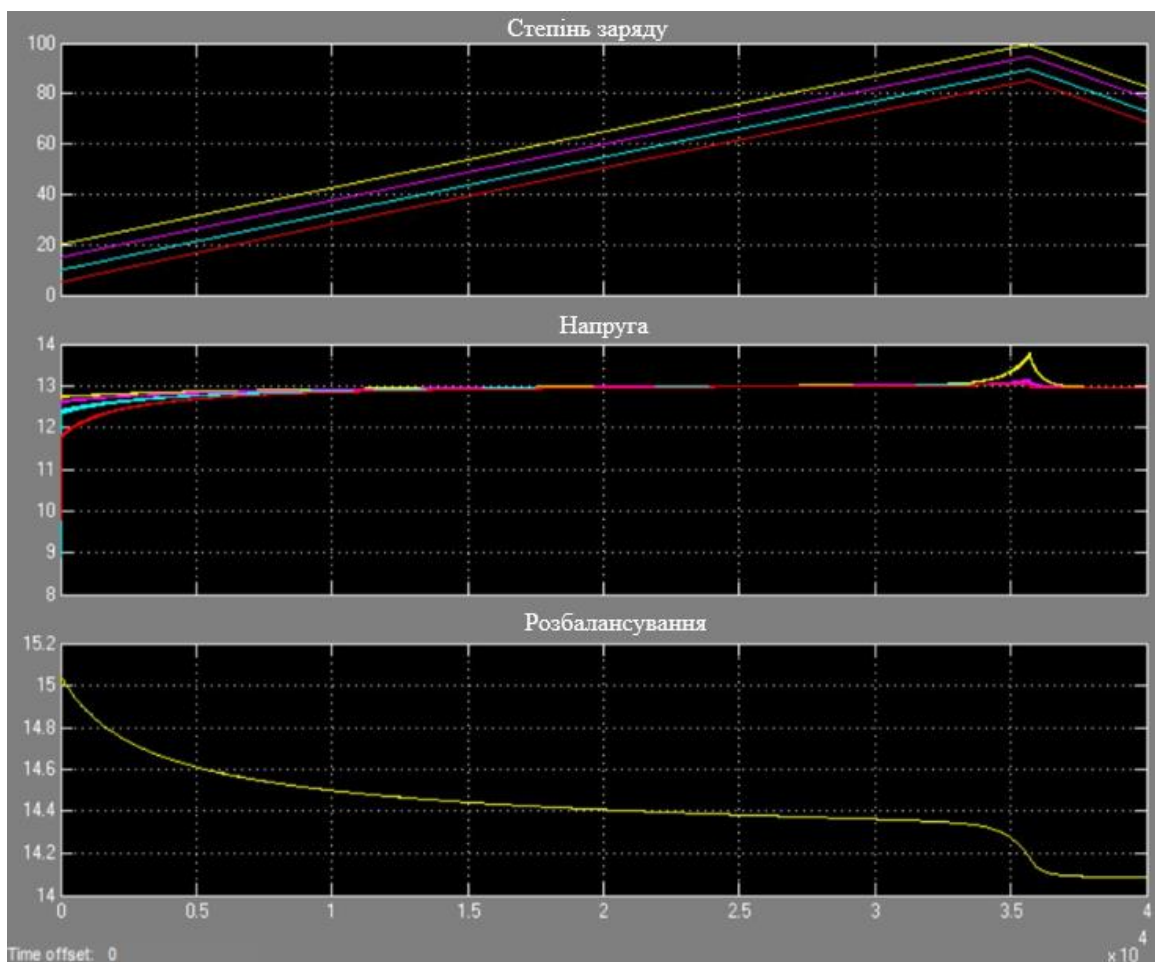


Рисунок 3.23 – Результати моделювання при заряді АКБ.

Як видно з осцилограми на рисунку 3.23, час заряду, коли АКБ повністю розряджені, становить 35720 сек. (9.56 години). За цей проміжок часу величина розбалансування знизилась з 15% до 14.05%.

3.4 Висновки до розділу

Здійснена побудова математичних моделей для дослідження роботи в різних режимах комбінованої системи електропостачання на основі вітрової установки.

Основними вхідними змінними імітаційної моделі були: вітровий потенціал та потужність навантаження. Для електротехнічного комплексу з

вітро-дизельною установкою до порушення статичної стійкості можуть призвести зміна потужності, яка генерується установкою або споживаної потужності. Для забезпечення можливості дослідження швидкості вітрового потоку при різних режимах, на основі змодельованої механічної характеристики, в імітаційній моделі передбачено зміна швидкості вітрового потоку від 0 до 16 м/с та потужності навантаження від 0 до 7 кВт.

При різних вхідних параметрах встановлено стійкість роботи системи генерації за вихідними параметрами за трьома варіантами:

1. Споживач отримує електричну енергію від *BEU* при $S_{BEU} \geq S_{нав}$:

– якщо $S_{BEU} > S_{нав}$, надлишок потужності витрачається на зарядження *АКБ*

;

– якщо $S_{BEU} > S_{нав}$ та заряд *АКБ* максимальний, то невикористана потужність розсіюється на баластному навантаженні.

2. Електропостачання споживача здійснюється від *ДГУ*, при цьому $S_{BEU} = 0$ (*BEU* відімкнена або штиль).

3. *BEU* та *ДГУ* працюють паралельно на навантаження при нестачі потужності *BEU* $S_{BEU} \leq S_{нав}$: якщо $S_{BEU} = S_{нав}$ та заряд *АКБ* нижче мінімального значення, *ДГУ* вмикається для заряду *АКБ*.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Захисні міри для роботи з електроустановками напругою 0.38 кВ

1. Ізоляція струмоведучих частин [21].

Електричні апарати, вторинні ланцюги, електричні проводки напругою 0.38 кВ підлягають наступним випробуванням:

– вимірювання опору ізоляції (опір ізоляції повинен бути не менше значень, приведених в табл. 4.1);

– випробування ізоляції підвищеною напругою промислової частоти.

Випробування проводяться за нормами, які приведені в табл. 4.1. Тривалість прикладення нормованої напруги випробування - 1 хвилина.

Таблиця 4.1 – Норми приймально-здавальних випробувань ізоляції електричних апаратів, вторинних кіл, електричних проводок

Об'єкт випробування	Напруга мегаомметра, кВ	Опір ізоляції, МОм	Напруга випробування, кВ
Силові та освітлювальні сітки провідників	1.0	0.5	1.0
Розподільчі пристрої, щити	0.5 – 1.0	0.5	1.0

2. Недоступність струмопровідних частин [21].

Досягається розміщенням електричного обладнання та струмопровідних частин в спеціальних закритих з усіх сторін шафах, шафи закриваються на ключ. Встановлюють відповідаючи огорожі або струмопровідні частини розташовують на висоті, не доступній без спеціальних пристосувань. Розподільчі щити, щитки, розподільчі пункти розташовують в спеціальних приміщеннях або шафах, які закриваються та не мають струмопровідних частин на лицьовій стороні.

Затискачі електродвигунів та інших електричних приймачів, а також пускових апаратів мають бути закриті кожухом та недоступні для дотику.

3. При експлуатації електроустановок застосовують наступні методи орієнтації [21]:

– маркування електрообладнання (присвоєння певних букво-сміслових та цифрових позначень), які наносяться на корпус та двері, що відкривають доступ до електричного обладнання. Маркування провідників виконується на термоусадочній трубці у відповідності зі схемою електричною принциповою.

– використання попереджувального знаку „Обережно! Електрична напруга”.

Знак „Обережно! Електрична напруга” наноситься на дверях ввідно-розподільних пристроїв, шаф *ШВР* та попереджує про небезпеку ураження електричним струмом при її відкритті;

– відповідне розміщення та фарбування неізолюваних струмопровідних частин;

– застосування світлової сигналізації, яка вказує на увімкнений чи відключений стан шафи *ШВР*.

Кольори фарбування та порядок розміщення шин в шафі *ШВР* приведено в табл. 4.2.

4. Використання електрозахисних засобів при експлуатації електроустановок 0,38 кВ [21].

Перелік електрозахисних засобів, що використовують при експлуатації електроустановок 0.38 кВ, приведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.2 - Кольори фарбування та порядок розміщення шин в шафі

ШВР

Шина	Колір фарбування шин	Розміщення шин		
		При розміщенні ошинівки		В відгалуженнях
		вертикальному	горизонтальному, при нахилі, в трикутник	
<i>Фаза L1</i>	Жовтий	Верхня	Найбільш віддалена	Ліва
<i>Фаза L2</i>	Зелений	Середня	Середня	Середня
<i>Фаза L3</i>	Червоний	Нижня	Ближня	Права
Нульова робоча	Блакитний	–	–	–
Нульова захисна	Повздовжні жовті і зелені полоси	–	–	–

Таблиця 4.3 – Електрозахисті засоби при експлуатації електроустановок 0.38 кВ

Засоби захисту	Тип	Кількість
Електровимірювальні кліщі	<i>Ц – 91</i>	1 шт.
Показчики напруги	<i>УНН – 10</i>	2 шт.
Слюсарно-монтажний інструмент з ізолювальними руків'ями		1 комплект
Діелектричні рукавички		2 пари
Діелектричні калоші		2 пари
Ізолюючі підставки		2 шт.
Переносні заземлення	<i>ЗПГ – 1</i>	2 шт.
Плакати безпеки		1 комплект

Пожежна безпека [22].

Особливості пожеж в електроустановках зумовлені, в першу чергу, великим різновидом горючих речовин і матеріалів, які мають широкий діапазон показників пожежної та вибухової небезпеки. Це такі речовини і матеріали:

водень (для охолодження турбогенераторів), паливо на електростанціях (у тому числі природний газ, мазут, дизельне паливо), гідравлічне масло, трансформаторне масло, мастило, ізоляція електричних машин і кабелів, конструктивні матеріали на основі пластмас.

Причинами пожеж при експлуатації електроустановок є короткі замикання, перенавантаження, утворення великих місцевих перехідних опорів, електричні іскри і дуги та порушення правил експлуатації.

Профілактичні заходи щодо запобігання пожеж:

- правильний вибір і розрахунок апаратів захисту;
- використання в пожежонебезпечних приміщеннях будь-якого класу кабелів та проводів, які мають ізоляцію та оболонку з негорючих матеріалів;
- періодична перевірка якості контактних з'єднань;
- використання комутаційних апаратів закритого виконання з метою запобігання іскріння;
- обмеження поширення пожежі, що почалася, шляхом використання загальних, місцевих протипожежних бар'єрів, раціональним плануванням приміщень;
- забезпечення постійної готовності до дії засобів пожежогасіння.

При експлуатації електрообладнання використовують наступні засоби гасіння пожежі:

- ручні вогнегасники типу *ОУ – 5*, *ОУ – 8*, які застосовуються для гасіння невеликих пожеж всіх видів;
- вуглекислотний бром етиловий вогнегасник типу *ОУБ – 7*, який використовується для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою;
- система пожежного водопроводу приміщення;
- використання сухого піску для гасіння пожежі на електроустановці.

4.2 Основні принципи та способи захисту працівників та території підприємства при виникненні надзвичайних ситуацій

Основні принципи та способи захисту працівників і території [22].

Захист працівників і територій підприємства від надзвичайних ситуацій (*НС*) здійснюються на відповідних принципах, що забезпечують максимально ефективно вирішення проблеми. Ними є:

- пріоритетність завдань спрямованих на захист людей, збереження їх здоров'я та довкілля;
- обов'язковість завчасного планування і реалізації заходів щодо захисту працівників і територій з урахуванням економічних, природних та інших особливостей регіону та ймовірності виникнення *НС*;
- комплексне використання способів і засобів захисту та надання переваги раціональності при виборі способу захисту;
- вільний доступ працівників до інформації щодо захисту працівників від *НС*;
- особиста відповідальність керівників органів цивільного захисту (*ЦЗ*) і піклування громадян про власну безпеку, неухильне дотримання ними правил поведінки та дій у *НС*.

Основними способами захисту працівників від вражаючих дій факторів, що створюються в надзвичайних ситуаціях мирного та воєнного часу є:

Укриття людей в захисних спорудах [22].

Суть способу полягає у своєчасному укритті людей в спеціальних інженерних спорудах, які здатні захистити людей від дій вражаючих факторів або послабити їх дії.

Будівництво захисних споруд і їх утримання потребує багато часу та коштів. Тому ведеться накопичення фонду захисних споруд. Шляхи накопичення:

- будівництво сховищ одночасно з будівництвом нових підприємств, розрахованих на укриття робітників найбільшої працюючої зміни;
- будівництво окремих сховищ та протирадіаційних укриттів;
- використання метрополітену підземного пролягання;
- обладнання сховищ в підземних та інших заглиблених приміщеннях існуючих будівель і споруд;
- пристосування і використання частини приміщень освоєного підземного простору міст для захисту працівників;
- використання гірничих виробок і природних порожнин;
- масове будівництво найпростіших сховищ і укриттів в період загрози виникнення надзвичайних ситуацій за скорочені терміни (3-6 діб).

Наявний фонд захисних споруд в повсякденних умовах життєдіяльності використовується для господарських, культурних і побутових потреб у порядку, який забезпечує використання їх за прямим призначенням в установленій короткий термін.

Евакуаційні заходи [22].

Спосіб захисту, полягає в завчасному (до початку виникнення НС, в період загрози) вивезенні (виведенні працівників із місць можливого ураження, зони катастрофічного затоплення (зараження) в безпечні райони на тимчасове або постійне перебування.

Загальна евакуація проводиться для всіх категорій працівників і планується на випадок війни, можливого небезпечного радіоактивного забруднення територій, виникнення загрози катастрофічного затоплення місцевості з чотиригодинним доходженням проривної хвилі, лісових і торф'яних пожежах, інших явищ з тяжким наслідками, що загрожують населеним пунктам.

Під час проведення часткової евакуації завчасно вивозиться не зайняте у сфері виробництва та обслуговування працівників.

Радіаційний і хімічний захист [22].

Радіаційний і хімічний захист включає заходи щодо виявлення та оцінки радіаційної і хімічної обстановки, організації та здійснення дозиметричного та

хімічного контролю, розробка та впровадження типових режимів радіаційного захисту, забезпечення працівників засобами індивідуального та колективного захисту з необхідними характеристиками, організація та проведення спеціальної обробки.

Медичний захист [22].

Ці заходи спрямовані на запобігання або зменшення ступеня ураження людей завдяки своєчасному застосуванню медичних препаратів, надання медичної допомоги постраждалим та їх лікування і психологічного відновлення, забезпечення епідемічного благополуччя в зонах надзвичайних ситуацій, контролю за станом довкілля, санітарно-гігієнічною та епідемічною ситуацією.

Медичний захист може бути надійно здійснений за умов завчасного створення і підготовки спеціальних медичних формувань, накопичення медичних засобів захисту, медичного та спеціального майна і техніки, планування і використання існуючих сил та засобів, закладів охорони здоров'я незалежно від форм власності і господарювання. Велику роль в реалізації медичних заходів відіграє Державна Служба Медицини Катастроф, що складається з медичних сил і засобів та лікувальних закладів центрального і територіального рівнів, а також Центри медико-психологічної реабілітації, які створюються при діючих санаторно-курортних закладах.

Біологічний захист [22].

Біологічний захист працівників включає своєчасне виявлення чинників, масштабів та наслідків біологічного зараження і проведення комплексу адміністративно-господарських, режимно-обмежувальних та спеціальних протиепідемічних і медичних заходів.

Біологічний захист передбачає: своєчасне використання колективних та індивідуальних засобів захисту; запровадження режимів карантину та обсервації; знезаражування осередку бактеріологічного ураження; проведення в разі необхідності знезаражування людей; своєчасну локалізацію зони біологічного ураження; проведення екстреної та специфічної профілактики; додержання протиепідемічного режиму працівниками підприємства.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено математичне моделювання роботи комбінованої системи електропостачання на основі вітроенергетичної установки для забезпечення дослідження стійкості при різних режимах роботи.

1. Проведений аналіз розробок комбінованих систем на основі традиційних та відновлюваних джерелах енергії.

2. На основі аналізу вітрового потенціалу Тернопільської області проведено вибір діапазону швидкостей вітру в зоні локації вітроенергетичної установки.

3. На основі проведеного розрахунку навантажень приватного домогосподарства здійснено вибір елементів автономного енергетичного комплексу для побудови математичної моделі: вітроенергетичної установки на синхронного генератора на постійних магнітах потужністю 8 кВт ; дизель-генератор зі змінною швидкістю обертання потужністю 6 кВт ; інвертора; акумуляторної батареї.

4. Розроблена імітаційна комп'ютерна модель в середовищі *MatLab Simulink*, де передбачено зміна швидкості вітрового потоку від 0 до 16 м/с та потужності навантаження від 0 до 7 кВт .

5. На основі результатів експериментів розроблений алгоритм керування потужністю вітроенергетичної установки, що дозволяє забезпечити високу продуктивність при роботі в широкому діапазоні швидкостей вітру:

- а) споживач отримує електричну енергію від *BEU* при $S_{BEU} \geq S_{нав}$:
- якщо $S_{BEU} > S_{нав}$, надлишок потужності витрачається на зарядження *АКБ*;
 - якщо $S_{BEU} < S_{нав}$ та заряд *АКБ* максимальний, то невикористана потужність розсіюється на баластному навантаженні.

б) Електропостачання споживача здійснюється від *ДГУ*, при цьому $S_{BEU} = 0$ (*BEU* відімкнена або штиль).

в) *BEU* та *ДГУ* працюють паралельно на навантаження при нестачі потужності *BEU* $S_{BEU} \leq S_{нав}$: якщо $S_{BEU} = S_{нав}$ та заряд *АКБ* нижче мінімального значення, *ДГУ* вмикається для заряду *АКБ*.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. [Електронний ресурс]: [веб-сайт]. Разумков центр, 2022. Режим доступу: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>.
2. Чернюк А.М., Кирисов І.Н., Черевик Ю.О. Аналіз перспектив розвитку систем розподіленої генерації електроенергії в Україні. [Електронний ресурс]. / А.М. Чернюк, І.Н. Кирисов, Ю.О. Черевик // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки: Енергетика. – Том 32 (71) № 3, 2021, С. 239-246. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/36>.
3. Розподілена генерація електроенергії – глобальні тенденції розвитку. URL: <http://uare.com.ua/novyny/453-rozpodilena-generatsiya-elektroenergiji-globalni-tendantsiji-rozvitku.html>.
4. Сегеда М.С., Дудурич О.Б. Основні аспекти інтеграції вітрових електричних станцій в енергосистемі. // М. С. Сегеда, О. Б. Вісник/ Львів. політехн. - Львів: Львівська політехніка, 2016. - № 840: Електроенергетичні та електромеханічні системи. - С. 119-125.
5. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах / Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. // Технічна електродинаміка. Електроенергетичні системи та установки. – 2011. – № 1. С. 46–53.
6. Типи вітрогенераторів [Електронний ресурс] // atmosfera.ua – Режим доступу до ресурсу: <https://www.atmosfera.ua/uk/vitryani-elektrostantsii/tipivitro-generatoriv/>.
7. Камінський Ю. Вітрогенератори для дому: види, приблизні ціни, виготовлення своїми руками [Електронний ресурс] / Ю. Камінський. – Режим доступу до ресурсу: <https://cutt.ly/4e7twAi>.
8. Куц Т. Горизонтальний або вертикальний вітрогенератор? За і проти [Електронний ресурс] / Т. Куц // Компанія "Концепція Енергозбереження". –

2016. Режим доступу до ресурсу: <https://cutt.ly/Ge7tnGf>.

9. Kling W.L., J. G. Slootweg. Wind Turbines as Power Plants. URL: https://www.researchgate.net/publication/228488368_Wind_turbines_as_power_plants.

10. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О. Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн.ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.

11. Кузьо І. В. Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності / І. В. Кузьо, В. М. Корендій // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – № 679. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка», 2010. – С. 61–68.

12. Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О. Дослідження процесів перетворення вітру в локальних енергосистемах. Альтернативна енергетика і екологія. - Київ, 2011. № 8. - С. 44-49.

13. Кузнецов М.П. Можливості короткотермінового прогнозування швидкості вітру на українських ВЕС. Відновлювана енергетика. Київ, 2010. № 4. С. 40–47.

14. Лозинський А. О. Система керування вітроустановкою на базі нечіткого регулятора з врахуванням зміни аеродинамічних параметрів вітроротора / А. О. Лозинський, В. І. Щур // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Вип. 3/2015 (31). – Кременчук: Кременч. націон.ун-т ім. М. Остроградського, 2015. – С. 10–21.

15. Осадчий В.І., Скриник О.Я., Ошурок Д.О., Скриник О.А. Вітрові ресурси Тернопільської області // В.І. Осадчий, О.Я. Скриник, Д.О. Ошурок, О.А. Скриник / GEOINFORMATIKA, 2017, № 4 (64). С. 50-61 Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/322594266_Wind_resources_of_the_Ternopil_region.

16. Кудря С.А., Пермінов Ю.М., Буденний І.В. Особливості проектування вітрогенераторів. Відновлювальна енергетика. - Київ, 2014. № 3. - С. 54-57.
17. Відновлювані джерела енергії / За ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.
18. Романчук А.О., Теремішук С., д.т.н., проф. Толочко О.І., «Особливості віртуального фізичного моделювання механічних об'єктів з використанням блоків бібліотеки SimMechanics». Міжнародний науково- 2 технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"- НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» - 2016.
19. MATLAB, Simulink, Simpowersystem. Основи програмування: лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з дисципліни «Пакети прикладних програм», ч. I, спеціалізація "Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії" / О. І. Толочко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8241 кБ). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 226 с.
20. Гурко О.Г., Єрмоменко І.Ф. Г 95 Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ О.Г. Гурко, І.Ф.Єрмоменко. – Харків: ХНАДУ, 2011. –286 с.
21. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [Текст] : [затв. . Наказ М-ва палива та енергетики України 25.07.2006 № 258] // М-во палива та енергетики України. – Х.: Індустрія : Енергетичні рішення. – 2012. – 318 с.
22. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник [Електронний ресурс] / В.С. Стручок, – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2022.–150 с. Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424>.