

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

**«ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК»**

Виконав: студент 6-го курсу

групи Ен-61 із спеціальності

141 „Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка”

(шифр і назва спеціальності)

_____ Ониськів Р. Б. _____

Керівник: _____ к.т.н., доцент Бабич М. І.

Консультант: _____ к.т.н., доцент Коробка С. В.

Рецензент: _____

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Сиротюк С. В.
(вч. звання, прізвище, ініціали)

" ____ " _____ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Ониськіву Роману Богдановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Обґрунтування енергоефективності вітроелектричних установок»

керівник роботи: к.т.н., доцент Бабич М. І.
(наук.ступінь, вч. Звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського національного університету природокористування №140 к-с від 28.02.2025 р.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 05.12.2025 р.

3. Вихідні дані технічна документація, науково-технічна і довідкова література

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

Вступ

4.1. Аналіз особливостей застосування вітроелектричних установок різних типів

4.2. Розрахунок системи електропостачання на основі вітроелектричної установки

4.3 Розробка системи електропостачання на основі вітроелектричної установки

4.4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

4.5. Техніко-економічне обґрунтування енергоефективності функціонування системи електропостачання на основі вітроелектричної установки

Висновки і пропозиції

Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових кресле)
Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 5	<i>Коробка С. В. к.т.н., доцент</i>			
4	<i>Городецький І. М. к.т.н., доцент</i>			

7. Дата видачі завдання: 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз особливостей застосування вітроелектричних установок різних типів</i>	28.02.2025 – 22.09.2025	
2	<i>Розрахунок системи електропостачання на основі вітроелектричної установки</i>	23.09.2025 – 29.09.2025	
3	<i>Розробка системи електропостачання на основі вітроелектричної установки</i>	03.10.2025 – 13.10.2025	
4	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	14.10.2025 – 24.10.2025	
5	<i>Техніко-економічне обґрунтування енергоефективності функціонування системи електропостачання на основі вітроелектричної установки</i>	27.10.2025 – 07.11.2025	
6	<i>Завершення оформлення ілюстративної частини роботи</i>	10.11.25 – 17.11.25	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	21.11.25 – 05.12.25	

Студент _____ Тарас ОНИСЬКІВ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Михайло БАБИЧ
(підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 631.3.45.9

Ониськів Р. Б. «Обґрунтування енергоефективності вітроелектричних установок». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2025 р. 47 с. текстової частини, 15 таблиць, 16 рисунків, 20 джерел посилання.

У кваліфікаційній роботі обґрунтовано енергоефективність вітроелектричних установок шляхом комплексного аналізу їх технічних, енергетичних та економічних показників. Проаналізовано сучасний стан і перспективи розвитку вітроенергетики в Україні, розглянуто принципи роботи, конструктивні особливості та класифікацію вітроелектричних установок. Запропоновано методику оцінювання енергоефективності з використанням техніко-економічних критеріїв. Виконано розрахунок основних енергетичних характеристик вибраної вітроустановки, зокрема встановленої потужності, коефіцієнта використання енергії вітру та річного виробітку електроенергії. Проведено порівняльний аналіз енергоефективності різних типів вітроелектричних установок та здійснено оцінку економічної доцільності їх застосування в заданих природно-кліматичних умовах. За результатами дослідження сформульовано практичні рекомендації щодо підвищення ефективності перетворення енергії вітру в електричну та оптимізації параметрів вітроенергетичних систем.

У роботі обґрунтовано енергоефективність вітроелектричних установок на основі аналізу їх технічних, енергетичних та економічних характеристик з метою підвищення ефективності використання вітрової енергії.

ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, ВІТРОЕЛЕКТРИЧНА УСТАНОВКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГІЯ, КОЕФІЦІЄНТ ПОТУЖНОСТІ, ШВИДКІСТЬ ВІТРУ, РІЧНИЙ ВИРОБІТОК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК РІЗНИХ ТИПІВ.....	9
1.1 Дослідження енергетичного потенціалу вітру в Україні та Тернопільської області.....	9
1.2 Різновиди вітроенергетичних установок.....	11
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	16
2.1 Розрахунок мережі живлення 0,4 кВ.....	16
2.2 Визначення оптимальної потужності вітроенергетичної установки для підключення.....	27
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	29
3.1 Моделювання роботи вітроенергетичної установки в середовищі MATLAB\Simulink.....	29
3.2 Обґрунтування параметрів і режимів роботи ВЕУ.....	31
3.3 Дослідження роботи вітроустановки за умов змінних вхідних параметрів.....	33
3.4 Методи оптимального керування вітроенергетичними установками за критерієм енергоефективності.....	35
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	38
4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля.....	38
4.2 Протипожежна безпека і грозозахист.....	39
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	40

5.1	Обґрунтування енергоефективності функціонування системи електропостачання на основі вітроелектричної установки.....	40
	ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	44
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ.....	45

ВСТУП

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується активним пошуком шляхів заміщення традиційних джерел енергії екологічно чистими та відновлюваними. Одним із найперспективніших напрямів є використання енергії вітру, яка має значний технічний потенціал і не потребує спалювання викопного палива. Вітроенергетика відіграє важливу роль у зменшенні викидів парникових газів, підвищенні енергетичної незалежності держави та забезпеченні сталого розвитку енергетичного сектору.

Ефективність роботи вітроелектричних установок (ВЕУ) визначається низкою факторів, серед яких – конструктивні особливості вітротурбіни, аеродинамічні характеристики ротора, режим вітрових навантажень, а також місцеві кліматичні умови. Для забезпечення максимальної віддачі системи необхідно обґрунтовано підібрати параметри вітроустановки, здійснити енергетичний аналіз та оцінити економічну доцільність її впровадження.

Актуальність даної роботи полягає у зростаючій потребі в підвищенні енергоефективності вітроелектричних установок з урахуванням технічних та природно-кліматичних особливостей регіону їх експлуатації. Оптимізація параметрів таких систем сприяє зменшенню собівартості виробленої електроенергії, підвищенню надійності та довговічності обладнання.

Отже, обґрунтування енергоефективності вітроелектричних установок шляхом аналізу їх технічних, енергетичних та економічних показників і визначення шляхів підвищення ефективності використання енергії вітру.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтувати енергоефективність вітроелектричних установок шляхом аналізу їх технічних, енергетичних та економічних показників, а також визначити оптимальні параметри для підвищення ефективності перетворення енергії вітру в електричну.

Для досягнення цієї мети було визначено наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку вітроенергетики в Україні;

2. Розглянути принцип роботи, конструктивні особливості та класифікацію вітроелектричних установок;
3. Розробити методику оцінювання енергоефективності вітроустановок із використанням техніко-економічних показників;
4. Виконати розрахунок енергетичних характеристик вибраної вітроелектричної установки (потужності, коефіцієнта використання енергії вітру, річного виробітку електроенергії тощо);
5. Провести порівняльний аналіз енергоефективності різних типів вітроустановок за визначеними критеріями;
6. Оцінити економічну доцільність застосування вітроелектричних установок у визначених природно-кліматичних умовах;
7. Сформулювати рекомендації щодо підвищення енергоефективності роботи вітроенергетичних систем.

Об’єктом кваліфікаційної роботи є енергоефективність вітроелектричних установок різного типу шляхом аналізу їх технічних, енергетичних та економічних показників.

Предметом кваліфікаційної роботи є динамічні процеси роботи та енергоефективність вітроелектричних установок шляхом аналізу їх технічних, енергетичних та економічних показників.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК РІЗНИХ ТИПІВ

1.1 Дослідження енергетичного потенціалу вітру в Україні та Тернопільської області

За останнє десятиліття світова встановлена потужність вітроенергетики зросла приблизно на 26%, що значно перевищує темпи розвитку інших джерел енергії, хоча частка вітру в загальному споживанні електроенергії поки становить лише близько 2,5%. В Україні, за результатами досліджень, сумарний енергетичний потенціал вітру оцінюється в межах 16–24 ГВт, що свідчить про значні можливості для подальшого розвитку цієї галузі (рис 1.1).

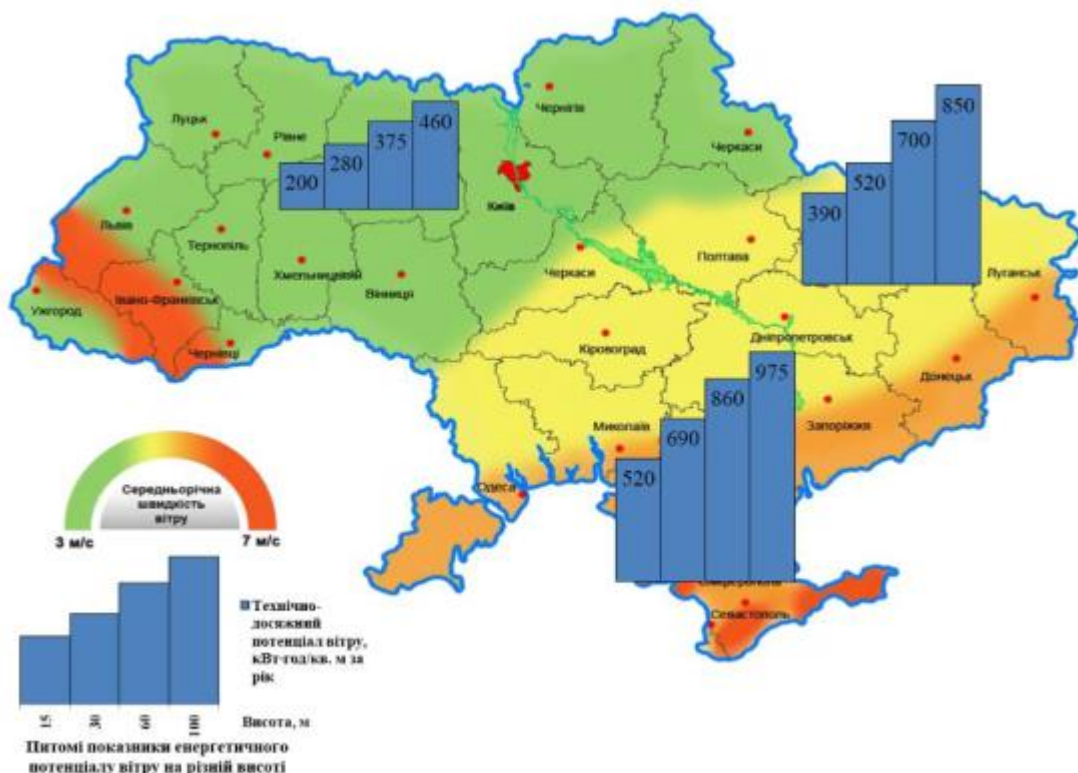


Рисунок 1.1 – Енергетичний потенціал вітрових ресурсів України.

Карта вітроенергетичного потенціалу України свідчить про значні ресурси вітру, проте їх розподіл є нерівномірним по території країни.

Найсприятливіші умови спостерігаються в районах Криму та Карпат, де середня швидкість вітру досягає близько 7 м/с, тоді як на більшій частині території вона становить 4–5 м/с. Згідно з дослідженнями [6], для Тернопільської області визначено показники середнього енергетичного потенціалу, що дають змогу оцінити ефективність роботи та доцільність встановлення конкретних типів вітроенергетичних установок у різних точках регіону (рис 1.2).

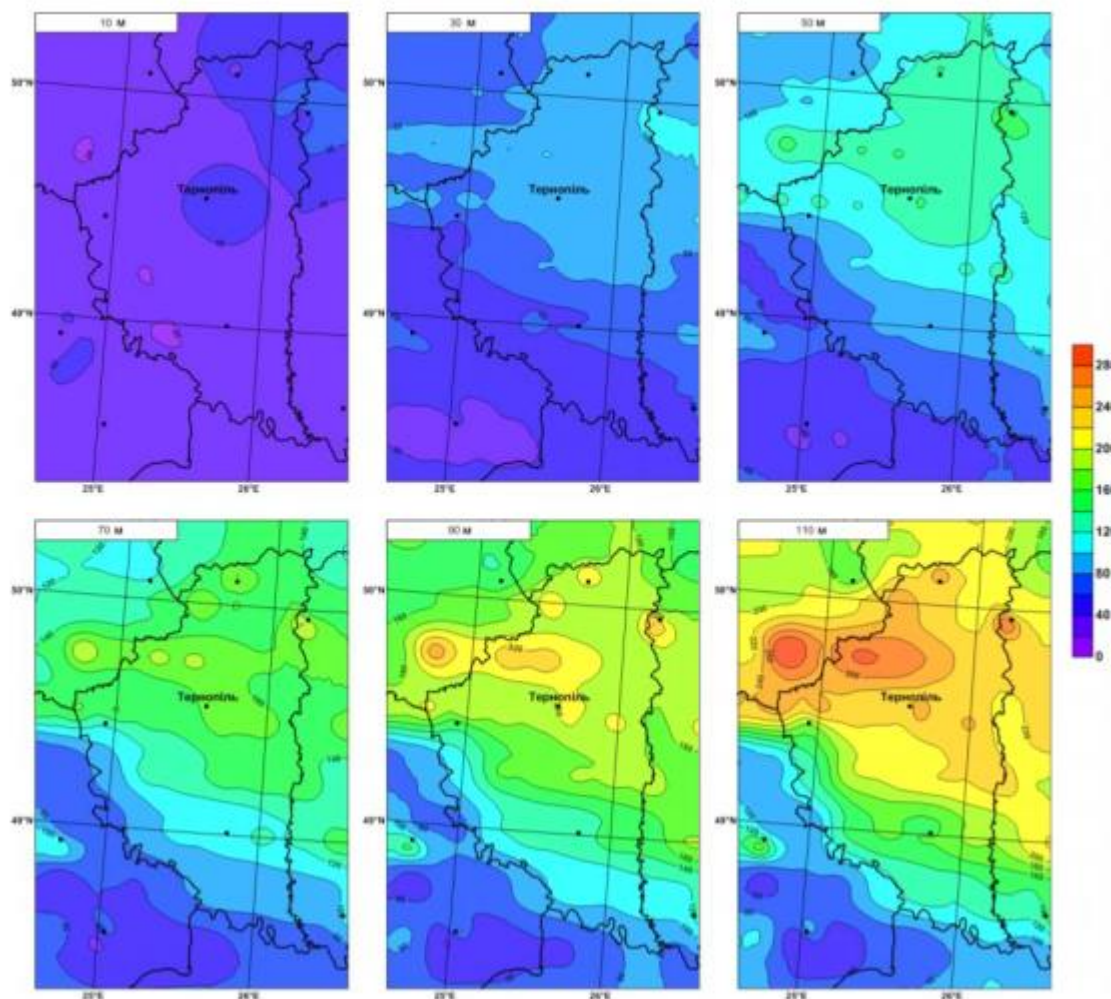


Рисунок 1.2 – Потенціал вітрової енергії Тернопільської області.

На основі проведених розрахунків визначено території, що мають найкращі умови для встановлення вітроенергетичних установок. Такі ділянки можуть бути використані як для приватного застосування, так і для промислового виробництва електроенергії. Найвищий потенціал вітрової енергії спостерігається на підвищених ділянках місцевості, особливо на висотах

понад 50 метрів. До найбільш перспективних районів належать Кременецькі гори та Гологори, розташовані на північному заході від міста Тернополя.

1.2 Різновиди вітроенергетичних установок

Наземні вітроелектростанції (ВЕС) є найбільш поширеним типом вітрових установок і об'єднують окремі турбіни в єдиний комплекс, здатний забезпечувати електроенергією як автономні об'єкти, так і працювати разом з енергосистемою [7, 8].

Морські вітроелектростанції розвиваються у країнах з виходом до моря завдяки спеціальному законодавству, що дозволяє будівництво морських вітропарків [9]. До морських ВЕС відносяться прибережні, офшорні та плаваючі установки. Прибережні ВЕС розташовуються неподалік від узбережжя, де використовуються модифіковані наземні турбіни з антикорозійними системами, закріплені на бетонних або сталевих фундаментах, а електроенергія передається на берег підводними кабелями [10].

Офшорні ВЕС будують на глибині 5–12 м на відстані 10–12 км від берега, встановлюючи вежі на палі завглибшки до 30 м, при цьому електроенергія також передається по підводних кабелях [11-15].

Плаваючі ВЕС використовуються на глибинах до 200 м і потребують спеціальних платформ із достатньою плавучістю для підтримки турбін та стабілізації від впливу вітру і хвиль, що вимагає складної технологічної розробки [16-19].

Сучасні вітроенергетичні установки (ВЕУ) поділяють на два основні типи: горизонтально-осьові та вертикально-осьові, які досліджуються з точки зору їх ефективності у сучасних технологіях (рис.1.3). Горизонтальні ВЕУ є найбільш популярними, оскільки їх вісь обертання паралельна землі, а лопаті обертаються назустріч вітру. Конструкція таких установок передбачає автоматичний поворот головної частини для орієнтації на вітер та регулювання лопатей для використання слабого вітру. Вертикальні ВЕУ обертаються

паралельно поверхні землі незалежно від напрямку вітру, але половина лопатей завжди працює проти вітру, що знижує їх енергоефективність. Проте вертикальні установки простіші в монтажі та обслуговуванні, оскільки редуктор і генератор розміщені на землі, хоча їх монтаж і експлуатація потребують значних витрат і великої площі.

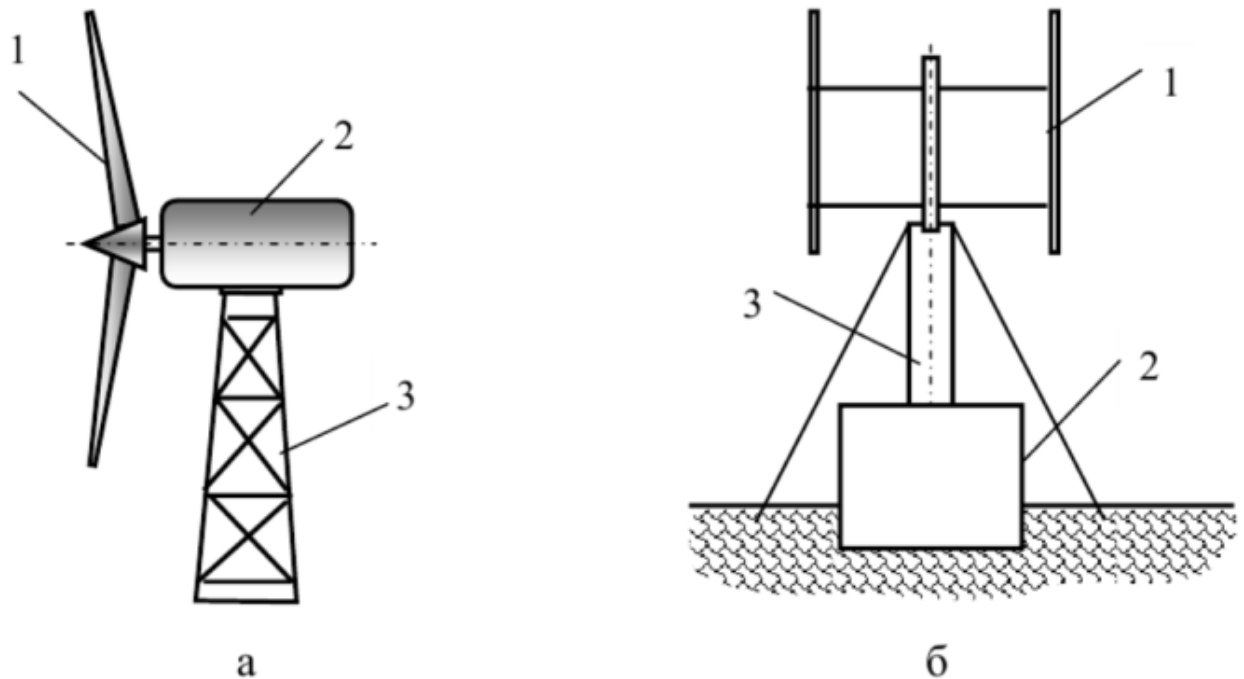


Рисунок 1.3 – Вітроустановки: а – горизонтально-осьові, б – вертикально-осьові.

ВЕС використовуються для електропостачання різних об'єктів — від малих автономних мікровітроустановок потужністю 0,04–0,25 кВт до великих мережових турбін потужністю до 7,5 МВт, що інтегруються в промислові електростанції. Класифікація вітроустановок здійснюється за видом виробленої енергії, потужністю, областю застосування, призначенням, способами керування та структурою системи генерування. За видом енергії вони поділяються на механічні (вітронасосні та вітросилові) та електричні (постійного або змінного струму). Потужність ВЕС визначає їх як великі (>1 МВт), середні (100 кВт–1 МВт), малі (5–99 кВт) або дуже малі (<5 кВт).

Головною відмінністю горизонтально-осьових вітроустановок від вертикально-осьових є розташування осі обертання ротора: у горизонтальних

ВЕУ вона паралельна землі і співпадає з напрямком вітрового потоку. Ротор таких установок перетворює частину енергії вітру в обертальний рух, який через мультиплікатор передається на електричний генератор для виробництва електроенергії (рис.1.4).

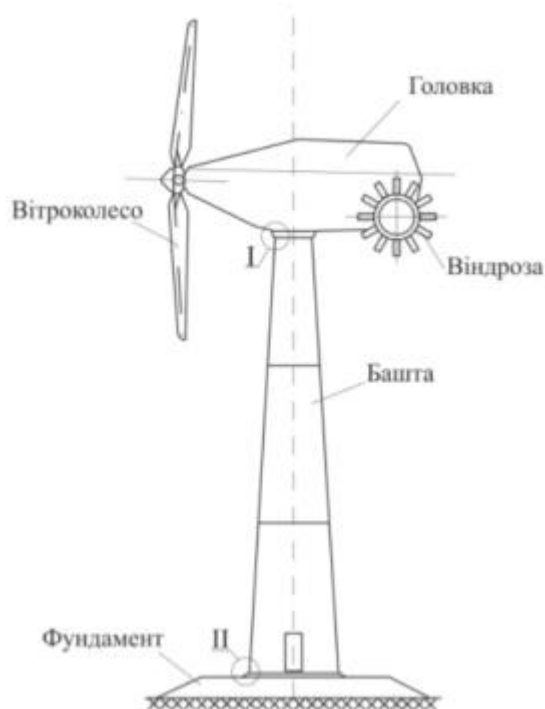


Рисунок 1.4 – Схема вітроустановки з горизонтальною віссю обертання.

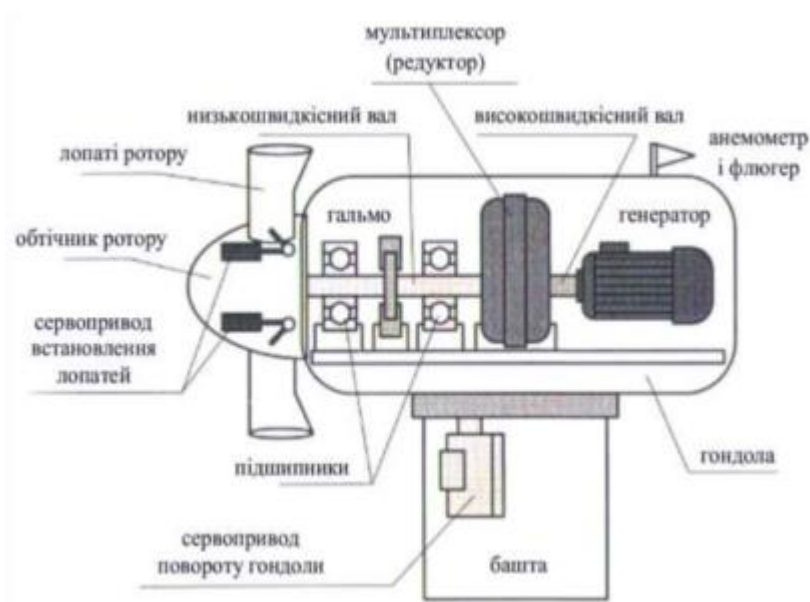


Рисунок 1.5 – Головні компоненти вітроелектричної установки.

Для ефективної роботи ВЕУ необхідне орієнтування осі ротора за напрямком вітру, що здійснюється різними системами, зокрема флюгером або віндрозами. Гондола, що містить ротор, мультиплікатор, генератор та інші системи, розташовується на вежі і повертається разом зі зміною напрямку вітру, забезпечуючи оптимальне використання енергії вітру (рис.1.5). Найефективніші установки мають дві або три лопаті, оскільки більша кількість створює взаємні перешкоди, а найпоширенішою є трилопатева конструкція з горизонтальною віссю обертання. Лопаті є найбільш навантаженими елементами ВЕУ, які піддаються впливу вітрових сил, інерційних навантажень та сили тяжіння, тому для їх виготовлення використовують склопластик, сталь або алюміній, найчастіше – склопластик. Гондоли раніше робили зі сталі, нині застосовують скловолокнисті композитні матеріали, що забезпечують кращу звукоізоляцію і стійкість до температурних коливань. Витрати на виготовлення вежі складають близько 20% вартості ВЕУ. Зі збільшенням довжини лопатей зростає висота вежі і, відповідно, вихідна потужність установки. Високі вежі піддаються значним навантаженням, а їх міцність залежить від матеріалу виготовлення, найчастіше використовують сталь або бетон.

Вітроенергетичні установки оптимізують для максимальної генерації електроенергії при найбільш імовірних швидкостях вітру, оскільки проектування під високі швидкості є економічно не вигідним через їх рідкісність. Водночас всі ВЕУ потребують регулювання під час сильних вітрів, інакше можливе руйнування ротора або перевантаження силових передач, що створює небезпеку для навколишніх об'єктів і людей [19]. Підвищення міцності рухомих елементів може запобігти аваріям, проте це збільшує масогабаритні характеристики та знижує ККД установки [8]. При роботі генератора завжди виникають енергетичні втрати, що призводять до виділення тепла і підвищення температури сталі, міді та ізоляційних матеріалів [20]. Поступове нагрівання конструктивних елементів скорочує термін служби генератора і може спричинити загоряння або втрату магнітних властивостей елементів при температурах понад 150 °C [15]. Для запобігання перегріву в промисловості

застосовують системи охолодження, однак на ВЕУ більш доцільно використовувати адаптивне регулювання частоти обертання ротора. Практика показує, що при певних частотах обертання можуть виникати резонансні коливання щогли і ротора, які відбуваються при значно нижчій швидкості, ніж гранична частота обертання [14]. Постійні розгони та гальмування ротора вітроенергетичної установки призводять до проходження через резонансну частоту, що при тривалому впливі викликає руйнування підшипників, фундаменту та інших елементів конструкції [16]. Для безпечної експлуатації ВЕУ необхідне оснащення системами управління та аварійного гальмування, що запобігають негативним ефектам. Проведений аналіз енергетичного потенціалу України та Тернопільської області показав високі ресурси вітру, що робить його перспективним джерелом енергії, а розробка імітаційних моделей вітроустановок дозволяє досліджувати їхні енергетичні характеристики.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Розрахунок мережі живлення 0,4 кВ

Розрахунок мережі живлення 0,4 кВ проводиться з метою визначення електричних навантажень, струмів у лініях, втрат напруги та потужності, а також для оцінки відповідності параметрів мережі вимогам нормативних документів. На основі вихідних даних про споживачів, схему електропостачання та характеристики проводів здійснюється побудова розрахункової моделі. Отримані результати використовуються для подальшого аналізу енергоефективності, вибору оптимальних засобів захисту й покращення якості електроенергії. Зростає встановлена потужність електрообладнання сільськогосподарських підприємств і побутових споживачів, що наблизило їхні вимоги до надійності та якості електропостачання до рівня промислових об'єктів. Зважаючи на значні витрати та тривалі строки енергетичного будівництва, актуальним є пошук економічно доцільних і сучасних рішень для розвитку систем електропостачання. Для аналізу показників якості електроенергії було обрано одну із ділянок мережі 0,4 кВ у м. Кременець Тернопільської області, що наведено на рис. 2.1, за якою створено модель для подальших розрахунків.

Для виконання розрахунку мережі було зібрано та систематизовано необхідні вихідні дані. У табл. 2.1 наведено значення напруги у вузлах електричної мережі, що використовуються для подальших розрахунків. Табл. 2.2 містить інформацію про типи та довжини кабельних ліній, які входять до складу досліджуваної ділянки. Ці дані є основою для аналізу стану мережі та визначення її основних параметрів.

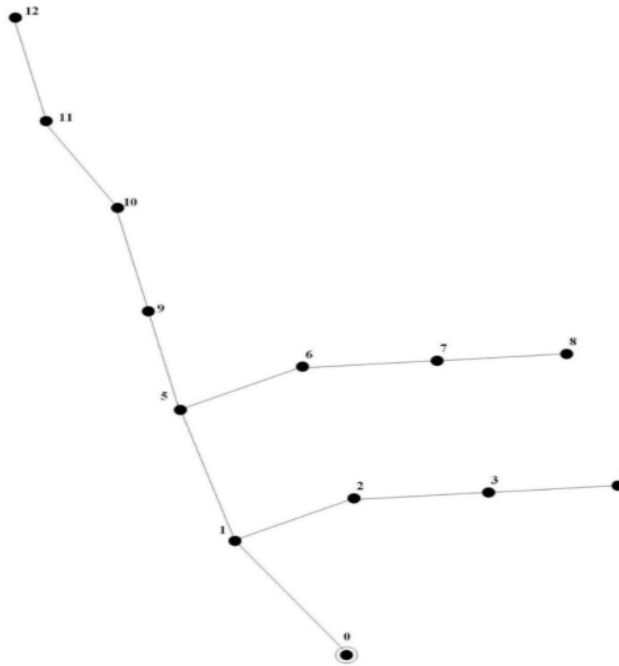


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд фрагмента мережі 0,4 кВ.

Таблиця 2.1 – Рівні напруги у вузлах електричної мережі

Номер ділянки лінії	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Напруга, В	218	215	211	209	214	210	208	205	205	203	198	196

На основі питомих опорів проводів розраховується опір кожної ділянки мережі. Активний опір ділянки 1–2 визначається за формулою:

$$r_{(1-2)} = \frac{r_{016}}{k} \cdot L = \frac{1,91}{4} \cdot 0,06 = 0,0287 \text{ (Ом)} \quad (2.1)$$

де r_{016} – питомий опір проводу (Ом/км); L – довжина ділянки (км); S – переріз проводу (мм²).

Після підставлення відповідних значень для ділянки 1 – 2 отримаємо її активний опір.

Розрахунок геометричного місця проводів проводиться для визначення їхніх координат і положення у просторі, що необхідно для точного аналізу електричних параметрів та втрат напруги. Це дозволяє побудувати модель

мережі та врахувати вплив довжини і конфігурації проводів на опір і падіння напруги в ділянках.

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{500 \cdot 500 \cdot 500} = 629,96 \text{ мм} \quad (2.2)$$

де D — відстань між фазними проводами лінії електропередачі (ЛЕП).

Таблиця 2.2 – Перелік кабельних ліній мережі 0,4 кВ

Номер ділянки лінії	Тип кабелю	Довжина, м
0-1	СП 4x50	120
1-2	СП 2x16	60
2-3	СП 2x16	60
3-4	СП 2x16	60
1-5	СП 4x35	150
5-6	СП 2x16	60
6-7	СП 2x16	60
7-8	СП 2x16	60
5-9	СП 2x25	150
9-10	СП 2x16	60
10-11	СП 2x16	60
11-12	СП 2x16	60

Питомі опори проводів СП різних перерізів, наведені в таблиці 2.3, отримано за даними виробника.

Таблиця 2.3 – Значення питомого опору проводів СП різних перерізів

Переріз, мм ²	16	25	35	50
Питомий опір. Ом/км	1.91	1,2	0.565	0.641

Індуктивний опір номера ділянки лінії 1 – 2 визначається за формулою:

$$x_{0(1-2)} = 0,145 \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot D_{cp}}{d}\right) + \frac{0,016}{k} = 0,145 \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot 629,96}{5}\right) + \frac{0,016}{2} = 3,2 \frac{Ом}{км} \quad (2.3)$$

де d — товщина (діаметр) струмопровідної жили проводу.

$$x_{(1-2)} = \frac{x_{0(1-2)}}{k} \cdot L = \frac{3,2}{2} \cdot 0,06 = 0,096 Ом \quad (2.4)$$

Номінальна напруга лінії електропередачі складає 0,4 кВ, тому втрати на ефект корони можна вважати відсутніми, тобто $\Delta P_{ок} = 0$. Через це активна провідність ділянки 1–2 наближається до нуля, $g_{1-2} = 0$. Водночас слід визначити питому ємнісну реактивну провідність для цієї ділянки окремо. Такий підхід спрощує розрахунок електричних параметрів мережі. Це дозволяє точно врахувати вплив ємності на загальний режим роботи лінії.

$$b_{0(1-2)} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{2 \cdot D_{cp}}{d}\right)} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{2 \cdot 629,96}{5}\right)} = 3,33 \cdot 10^{-6} \frac{См}{км} \quad (2.5)$$

Відповідно визначається ємнісна реактивна провідність:

$$b_{(1-2)} = k \cdot L \cdot b_{0(1-2)} = 2 \cdot 0,06 \cdot 3,33 \cdot 10^{-6} = 0,410^{-6} \frac{См}{км} \quad (2.6)$$

Загальний (повний) опір ділянки 1–2.

$$Z_{(1-2)} = r_{(1-2)} + ix_{(1-2)} = 0,029 + 0,096i Ом; \quad (2.7)$$

Загальна провідність ділянки 1-2:

$$Y_{(1-2)} = g_{(1-2)} + ib_{(1-2)} = 0 + 0,04i Ом; \quad (2.8)$$

Аналогічним чином виконано розрахунки для всіх ділянок мережі, а їхні результати наведені в таблиці 2.4.

Оскільки номінальна потужність кожного споживача становить 9 кВт при коефіцієнті потужності $\cos\varphi = 0,9$, виконаємо визначення повної потужності. Для цього активну потужність необхідно поділити на значення коефіцієнта потужності. Отримане значення характеризує фактичну повну потужність

споживачів у мережі. Таким чином, можна перейти до подальшого розрахунку потокорозподілу та рівнів напруги.

$$P = S_{cn} \cdot \cos \varphi = 9 \cdot 0,9 = 8,1 \text{ кВт} \quad (2.9)$$

$$Q = S_{cn} \cdot \sin \varphi = 9 \cdot 0,44 = 3,92 \text{ кВт} \quad (2.10)$$

$$S_{\max} = P - i \cdot Q = 8,1 - i3,92 = 3,92 \text{ кВА} \quad (2.11)$$

Таблиця 2.4 – Значення розрахованих опорів номера ділянок ліній електропередач

Ділянка	Активний опір, Ом	Індуктивний опір, Ом	Ємнісна провідність, $\cdot 10^{-6}$ См	Повний опір, Ом	Повна провідність, $\cdot 10^{-6}$ См
0–1	0,005	0,008	1,65	$0,005 + i0,008$	$i1,65$
1–2	0,029	0,096	0,40	$0,029 + i0,096$	$i0,40$
2–3	0,029	0,096	0,40	$0,029 + i0,096$	$i0,40$
3–4	0,029	0,096	0,40	$0,029 + i0,096$	$i0,40$
1–5	0,008	0,011	1,99	$0,008 + i0,011$	$i1,99$
5–6	0,029	0,096	0,40	$0,029 + i0,096$	$i0,40$
6–7	0,029	0,096	0,40	$0,029 + i0,096$	$i0,40$
7–8	0,029	0,096	0,40	$0,029 + i0,096$	$i0,40$
5–9	0,045	0,023	0,97	$0,045 + i0,023$	$i0,97$
9–10	0,029	0,096	0,40	$0,029 + i0,096$	$i0,40$
10–11	0,029	0,096	0,40	$0,029 + i0,096$	$i0,40$
11–12	0,029	0,096	0,40	$0,029 + i0,096$	$i0,40$

Початкові значення напруг у вузлах визначаються для подальшого проведення розрахунків потокорозподілу в електричній мережі. Ці значення приймаються як вихідні дані, що характеризують стан системи до виконання ітераційного процесу. Вони дозволяють оцінити баланс потужностей та уточнити втрати напруги на окремих ділянках. Надалі ці дані

використовуються для перевірки точності та збіжності розрахунків у моделі мережі.

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = U_5 = U_6 = U_7 = U_8 = U_9 = U_{10} = U_{11} = U_{12} = U_n = 220 \text{ В} \quad (2.12)$$

Розрахункове струмове навантаження у вузлах визначається з повної (апаратної) потужності навантаження і значень напруги та коефіцієнта потужності. Для однофазного навантаження формула має вигляд:

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} + Y_1 \cdot U_1 = \frac{8,1 - i3,92}{220} + i1,65 \cdot 10^{-6} \cdot 220 = 35,55 - i17,22 \text{ А} \quad (2.13)$$

Таблиця 2.5 — Розраховані струмові навантаження у вузлах

Вузол	Струмове навантаження, А
1	35,55 – i17,22
2	35,55 – i17,22
3	35,55 – i17,22
4	35,55 – i17,22
5	35,55 – i17,22
6	35,55 – i17,22
7	35,55 – i17,22
8	35,55 – i17,22
9	35,55 – i17,22
10	35,55 – i17,22
11	35,55 – i17,22
12	35,55 – i17,20

Проведемо визначення струмів, що протікають через кожну ділянку електричної мережі:

$$I_{(0-1)} = \sum_{n=1}^{12} I_k = (35,55 - i17,22) \cdot 12 = 426,54 - i206,58 \text{ А} \quad (2.14)$$

$$I_{(2-3)} = I_3 + I_4 = (35,55 - i17,22) \cdot 2 = 71,09 - i34,43 \text{ А} \quad (2.15)$$

Струмове навантаження для інших ділянок мережі розраховане аналогічно, результати наведені в табл. 2.6.

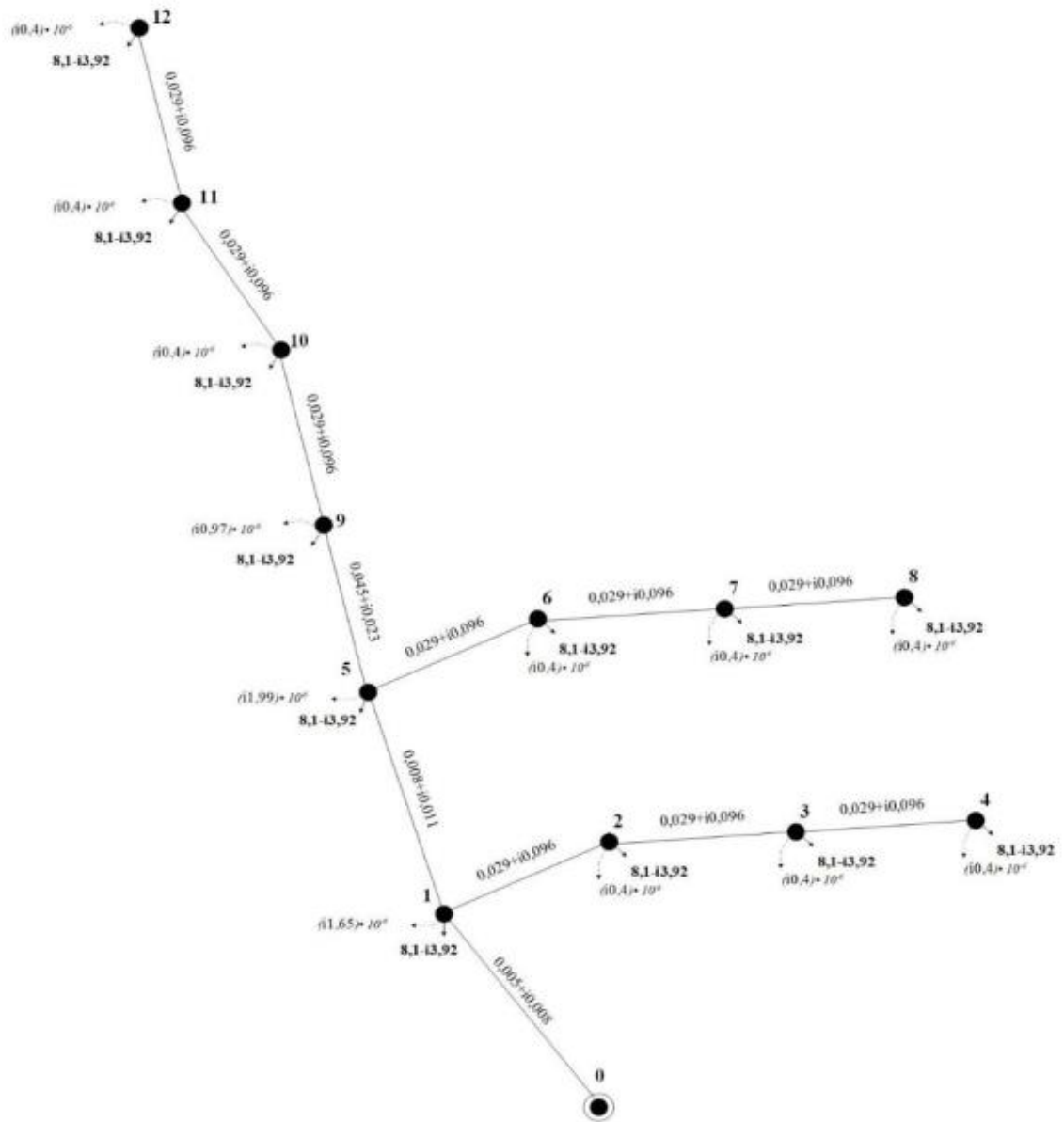


Рисунок 2.2 – Початкові параметри електричної схеми, розраховані для аналізу мережі

Таблиця 2.6 – Струмові навантаження по окремих ділянках мережі

Ділянка	Струмове навантаження, А
0–1	426,54 -i 206,58
1–2	106,63 -i 51,65
2–3	71,09 -i 34,43
3–4	35,55 -i 17,22
1–5	284,36 -i 137,72
5–6	106,63 -i 51,65
6–7	71,09 -i 34,43
7–8	35,55 -i 17,22
5–9	142,18 -i 68,86
9–10	106,63 -i 51,65
10–11	71,09 -i 34,43
11–12	35,55 -i 17,22

Розраховуємо рівні електричних напруг у вузлах мережі для подальшого аналізу:

$$U_{(1)} = U_0 - I_{(0-1)} \cdot Z_{(0-1)} = 220 - (426,54 - i206,58) \cdot (0,005 + i0,008) = 216,22 - i2,58 \text{ В} \quad (2.16)$$

Рівні напруг для інших вузлів мережі розраховані аналогічно, а результати наведені в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Вихідні та розраховані напруги вузлів мережі

Вузол	Напруга, В
1	216,22 -i 242,58
2	212,67 -i 242,11
3	210,34 -i 241,81
4	209,12 -i 241,66
5	212,41 -i 244,55
6	208,86 -i 244,09
7	206,49 -i 243,79
8	205,31 -i 243,64
9	204,43 -i 244,71
10	200,88 -i 244,24
11	198,52 -i 243,94
12	197,33 -i 243,79

Проведемо обчислення сумарних енергетичних втрат у мережі:

$$\Delta S_{(1)} = \dot{U}_0 - I_{(0-1)} \cdot \sum S_s = 220 \cdot (426,54 - i206,58) \cdot (93,84 - i45,54) \cdot 10^3 = i0,386 \text{ ВА} \quad (2.17)$$

Здійснимо уточнений розрахунок струмових навантажень у вузлах на основі оновлених значень напруг:

$$I_{(1)} = \frac{S_1}{U_1} + Y_1 \cdot U_1 = \frac{8,1 - i3,92}{216,22 - i2,58} + i1,65 \cdot 10^{-6} \cdot (216,22 - i2,58) = 35,95 - i17,95 \text{ А} \quad (2.18)$$

Струмові навантаження інших вузлів розраховані аналогічно, а результати представлені в табл. 2.8.

Повторно проведемо розрахунок струмових навантажень для усіх ділянок мережі. Це необхідно для перевірки правильності попередніх результатів та уточнення параметрів роботи системи. Отримані значення дадуть змогу оцінити рівномірність розподілу навантаження між вузлами. На основі оновлених даних

можна буде скоригувати режим роботи мережі з метою підвищення її ефективності.

Таблиця 2.8 – Оновлені значення струмових навантажень у вузлах

Вузол	Струмове навантаження, А
1	35,95- <i>i</i> 17,95
2	36,59- <i>i</i> 18,17
3	37,02- <i>i</i> 18,33
4	37,25- <i>i</i> 18,41
5	36,42- <i>i</i> 18,61
6	37,07- <i>i</i> 18,86
7	37,52- <i>i</i> 19,03
8	37,75- <i>i</i> 19,12
9	37,81- <i>i</i> 19,4
10	38,51- <i>i</i> 19,67
11	39- <i>i</i> 19,85
12	39,25- <i>i</i> 19,95

$$I_{(0-1)} = \sum_{n=1}^{12} I_n = (35,95 - i17,95) \cdot 12 = 450,14 - i227,33 \text{ А} \quad (2.19)$$

$$I_{(2-3)} = I_3 - I_4 = (37,02 - i18,33) + (37,25 - i18,41) = 74,27 - i36,74 \text{ А} \quad (2.20)$$

Аналогічним чином проведемо повторний розрахунок струмових навантажень для решти ділянок мережі. Це дозволить уточнити отримані результати та перевірити їх відповідність розрахунковим параметрам. Отримані дані відображають фактичний розподіл струмів у мережі після внесення змін. Підсумкові результати розрахунків подано в табл. 2.9.

Проведемо повторний розрахунок рівнів напруги у всіх пунктах мережі. Це дозволить визначити актуальні значення напруг після внесення змін у параметри системи.

Таблиця 2.9 – Оновлені дані щодо струмових навантажень у ділянках мережі

Ділянка	Струмове навантаження, А
0–1	450,14 - i 427,33
1–2	110,86 - i 54,91
2–3	74,27 - i 36,74
3–4	74,27 - i 36,74
1–5	303,32 - i 154,48
5–6	112,34 - i 57,00
6–7	75,27 - i 38,14
7–8	37,75 - i 19,12
5–9	154,56 - i 78,86
9–10	116,76 - i 59,47
10–11	78,24 - i 39,80
11–12	39,25 - i 19,95

Отримані результати дадуть змогу оцінити стабільність напруги в кожному вузлі. Підсумкові значення напруг наведено в таблиці для подальшого аналізу стану мережі.

$$U_{(1)} = U_0 - I_{(0-1)} \cdot Z_{(0-1)} = 220 - (450,14 - i227,33) + (0,005 + -i0,008) = 215,93 - i2,68 \text{ В} \quad (2.21)$$

Аналогічним чином проведемо повторний розрахунок рівнів напруги для решти вузлів мережі. Це дасть можливість уточнити показники напруги після оновлення параметрів системи. Отримані результати відображають реальний розподіл напруги між вузлами в оновленому режимі роботи. Підсумкові дані наведено в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Актуалізовані значення напруг у вузлах мережі.

Вузол	Напруга, В
1	215,93 - i 242,68
2	213,23 - i 242,16
3	211,75 - i 241,82
4	209,51 - i 241,65
5	211,78 - i 214,72
6	208,02 - i 244,16
7	205,54 - i 243,79
8	204,23 - i 243,60
9	203,02 - i 244,71
10	199,11 - i 244,12
11	196,49 - i 243,73
12	195,17 - i 243,53

Проведемо розрахунок загальних втрат потужності в електричній мережі. Для цього визначимо втрати на кожній окремій ділянці та підсумуємо їхні значення. Отримані результати дозволять оцінити ефективність роботи мережі та виявити найбільш навантажені відрізки. Підсумкове значення сумарних втрат потужності буде використано для подальшого аналізу енергетичних показників системи.

$$\Delta S_2 = U_0 - I_{(0-1)} \cdot \sum S_s = 220 - (450,14 - i227,33) + (93,84 - i45,45) \cdot 10^3 = 5190,79 - i4564,9 \text{ ВА} \quad (2.22)$$

Виконаємо перевірку збіжності проведеного ітераційного процесу. Це дозволить упевнитися в правильності виконаних обчислень і стабільності отриманих результатів. У разі виявлення розбіжностей буде проведено додаткові уточнення параметрів. Отримані дані дадуть змогу підтвердити достовірність розрахункової моделі мережі.

$$\varepsilon = \frac{|\Delta S_1 - \Delta S_2|}{\Delta S_2} \cdot 100\% \approx 100\% \quad (2.23)$$

Розрахунки слід виконувати послідовно доти, поки критерій збіжності не задовольнить умову $\varepsilon \leq 1\%$. Це гарантує отримання достатньо точних і стабільних результатів. Після досягнення необхідного рівня точності ітераційний процес вважається завершеним. Остаточні обчислені значення наведено на рис. 2.3.

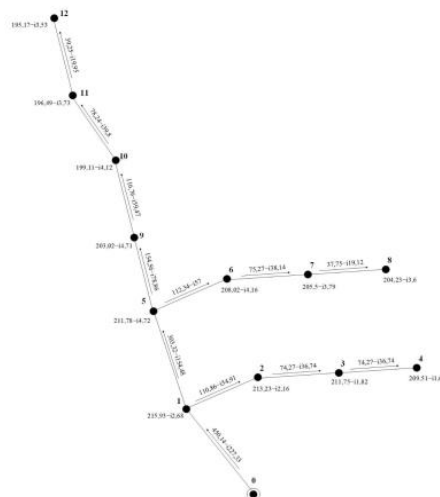


Рисунок 2.3 – Підсумкові результати моделювання мережі напругою 0,4 кВ

2.2 Визначення оптимальної потужності вітроенергетичної установки для підключення

Розрахунок необхідної потужності вітроенергетичної установки (ВЕУ) виконувався за аналогічною методикою, що й розрахунок мережі. Для аналізу було розглянуто варіант електричної мережі без додаткових джерел живлення. Місцем приєднання ВЕУ обрано вузол №12, оскільки саме в цьому вузлі зафіксовано найнижчий рівень напруги. Основною вимогою під час розрахунку потужності установки є забезпечення допустимого рівня напруги в усіх вузлах мережі. Відхилення напруги не повинно перевищувати 5% від її номінального значення. За результатами розрахунків визначено, що оптимальна потужність ВЕУ становить 36 кВт. Графічне відображення отриманих рівнів напруги у вузлах наведено на рис. 2.4.

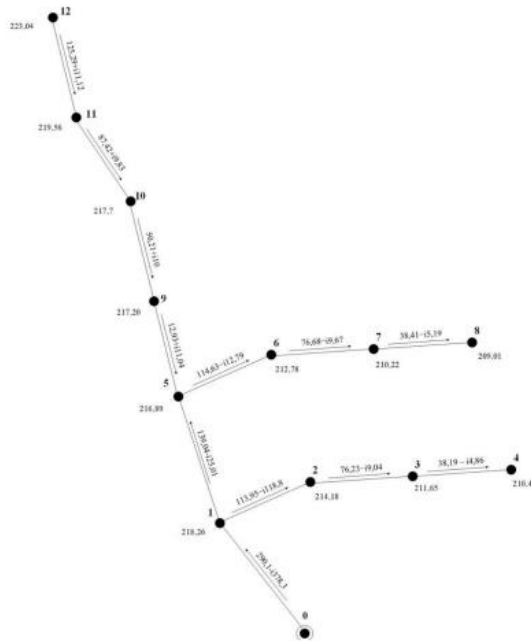


Рисунок 2.4 – Результати моделювання мережі 0,4 кВ після підключення ВЕУ до вузла 12.

Після підключення ВЕУ потужністю 36 кВт до вузла 12 напруга в усіх вузлах мережі підвищилася до допустимих меж відхилення $\pm 5\%$ від номінального значення. Найнижча напруга у вузлі 8 становить 209 В (відхилення 5%), тоді як у вузлі 12 спостерігається незначна перенапруга близько 1%. Для покращення режиму роботи мережі було виконано додатковий

розрахунок варіанту з двома вітроустановками меншої потужності, підключеними до вузлів 12 та 9, результати якого наведено на рис. 2.5.

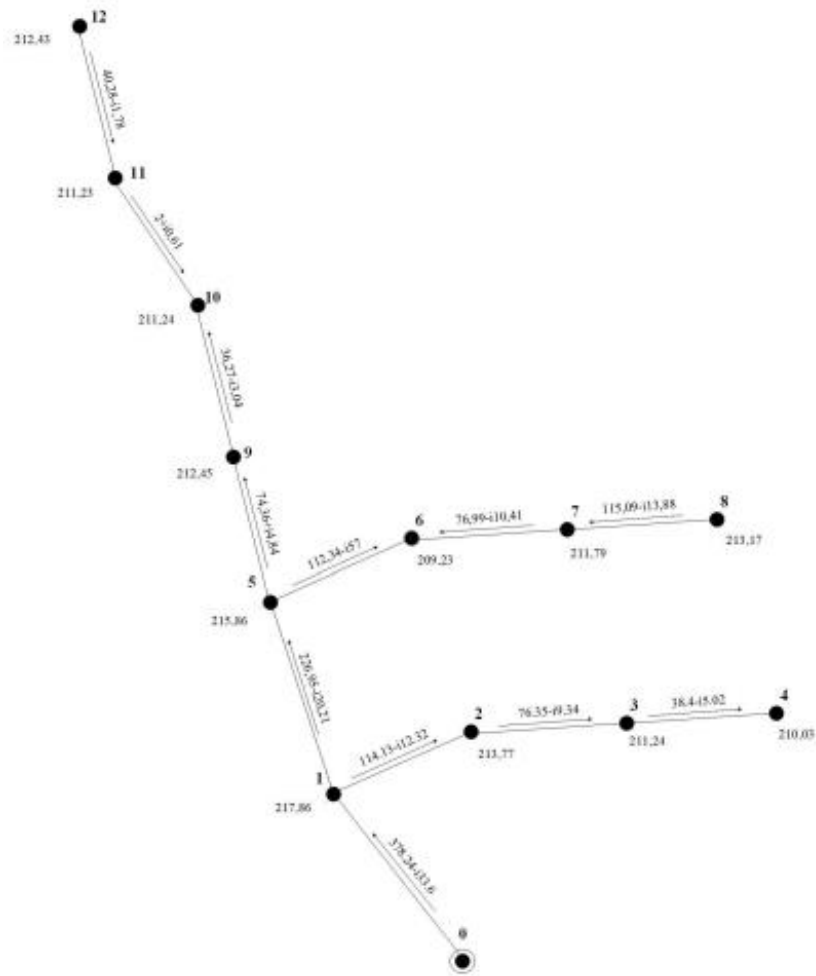


Рисунок 2.5 – Обґрунтування параметрів мережі 0,4 кВ під час підключення ВЕУ за номером ділянок лінії 8 та 12.

У результаті підключення двох вітроустановок потужністю 13 та 16 кВт до вузлів 9 і 12 було отримано такий самий ефект, як і при використанні однієї ВЕУ потужністю 36 кВт. Проте перший варіант із однією установкою визнано більш економічно доцільним через менші витрати на будівництво та обслуговування. Оскільки розрахована потужність 36 кВт відповідає піковому навантаженню всіх споживачів, було проведено додатковий аналіз добового графіка. З урахуванням застосування акумуляторних батарей як резервного джерела живлення номінальну потужність ВЕУ прийнято рівною 7,5 кВт. Таким чином, обраний варіант забезпечує стабільну роботу мережі за оптимальних техніко-економічних показників.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Моделювання роботи вітроенергетичної установки в середовищі MATLAB\Simulink.

На рис. 3.1 подано імітаційну візуалізовану математичну модель модуля вітроенергетичної установки з асинхронним генератором.

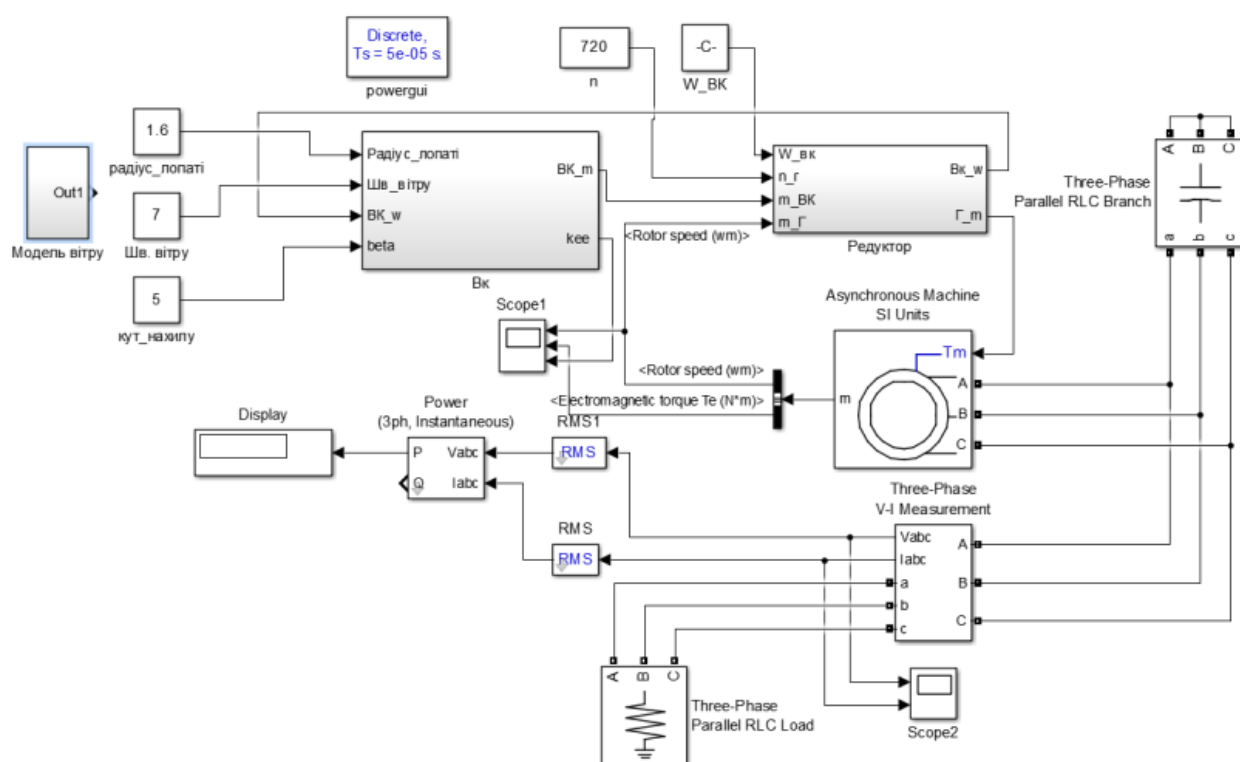


Рисунок 3.1 – Схематична модель вітроенергетичної установки.

Модель вітроенергетичної установки складається з кількох основних блоків. Блок *Asynchronous Machine SI Units* із бібліотеки *SimPowerSystems* представляє асинхронну машину, детальний опис і параметри якої наведено в розділі 2. Блок *Three-Phase Parallel RLC Branch* моделює трифазне коло, що складається з RLC-ланок, і в даній моделі використовується як конденсатор для збудження генератора з ємністю 119 мкФ. Компонент *Machines Measurement Demux* забезпечує вибір і зчитування необхідних параметрів машини, а блок *Three-Phase Series RLC Load* виконує роль активного навантаження потужністю

10 кВт. Розрахунок діючих значень струму та напруги здійснюється за допомогою блоку RMS, відповідно до виразу (3.1):

$$RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t)^2 dt} \quad (3.1)$$

де $f(t)$ – вхідний сигнал моделі роботи ВЕУ, T – період основної гармонічної складової сигналу моделі роботи ВЕУ.

У моделі вносять лише значення основної частоти сигналу, а блоки Three-Phase V-I Measurement та 3-phase Instantaneous Active & Reactive Power забезпечують вимірювання струмів і напруг у трифазних колах та розрахунок миттєвих значень активної й реактивної потужності без додаткових параметрів налаштування.

Реактивна потужність може бути обчислена лише за умови симетричного навантаження та відсутності гармонічних складових у кривих струму й напруги, при цьому розрахунок виконується за відповідними формулами:

$$P = \sqrt{3} \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V(\varphi t) \cdot I(\varphi t) dt; \quad (3.2)$$

$$Q = \sqrt{3} \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V(\varphi t) \cdot I\left(\varphi t - \frac{\pi}{2}\right) dt; \quad (3.3)$$

де P – активна потужність ВЕУ, Вт; Q – реактивна потужність ВЕУ, Вар; T – період, 1/с; V – діюче значення напруги ВЕУ, В; I – діюче значення струму ВЕУ, А; φ – кут зсуву фаз електричної мережі після підключення ВЕУ, градуси; t – час розрахунку роботи ВЕУ, с.

Блок Scope виконує функцію осцилографа, призначеного для відображення графіків зміни досліджуваних сигналів у часі під час моделювання. Display використовується як цифровий індикатор, що показує числові значення сигналів у режимі реального часу. Основним елементом системи є блок Powergui, який входить до складу пакета *SimPowerSystems* і забезпечує графічний інтерфейс користувача для виконання різних аналітичних і розрахункових операцій. За допомогою цього блоку можна здійснювати розрахунок схем у сталому та перехідному режимах, визначати імпеданс,

аналізувати моделі за допомогою *Simulink LTI-Viewer* і створювати характеристики для нелінійних елементів. Побудована імітаційна математична модель дає змогу досліджувати роботу вітроенергетичної установки за різних швидкостей вітру, кутів нахилу та довжин лопатей.

3.2 Обґрунтування параметрів і режимів роботи ВЕУ

У табл. 3.1 наведено основні вхідні параметри, що використовуються в моделі роботи вітроустановки при сталих вхідних умовах.

Таблиця 3.1 – Вхідні параметри роботи ВЕУ

Параметри	Значення
Швидкість впру, м/с	7
Радіус лопаті ВК. м	1,6
Кут нахилу лопаті.	0°
Потужність навантаження. кВт	5

На рис. 3.2 ілюструє зміну фазної напруги та струму генератора в часі.

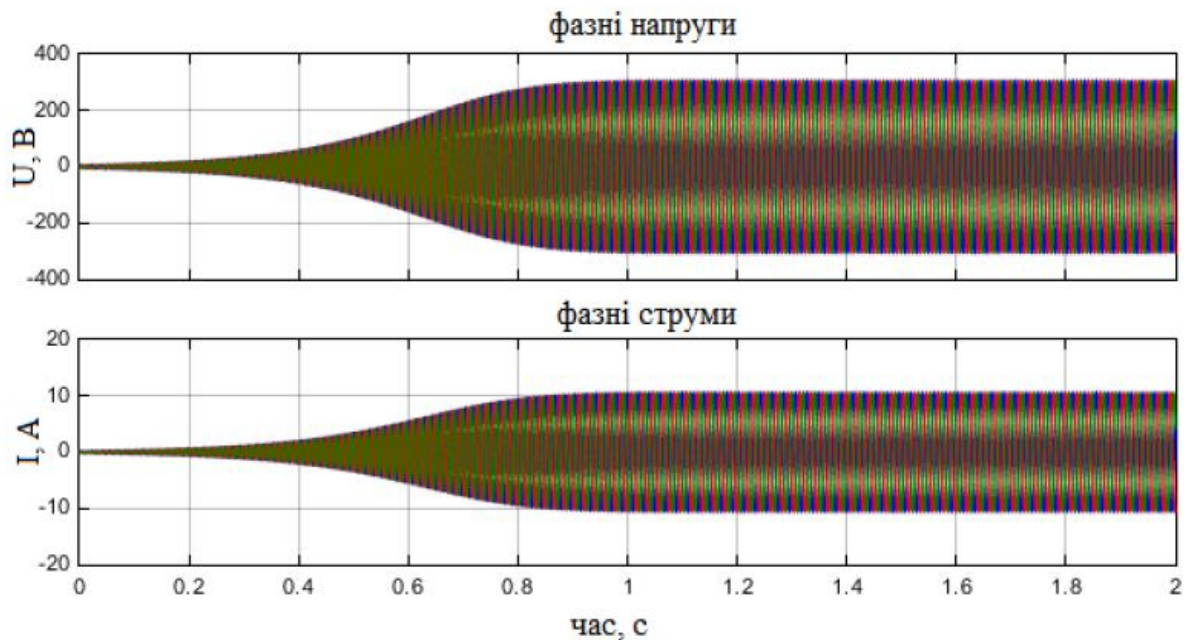


Рисунок 3.2 – Часові залежності зміни фазних напруг і струмів генератора.

На рис. 3.2 показано часові залежності фазних напруг і струмів генератора. Із графіка видно, що протягом проміжку часу від 0 до 0,9 с

відбувається поступове зростання напруги та струму. Після 1 с ці параметри стабілізуються й досягають номінальних значень: фазна напруга $U_{\phi} = 310$ В та струм навантаження $I_{\phi} = 10,7$ А. В усталеному режимі частота напруги становить 50 Гц, що підтверджується даними на рис. 3.3, де наведено часові залежності фазних напруг і струмів у зменшеному часовому масштабі.

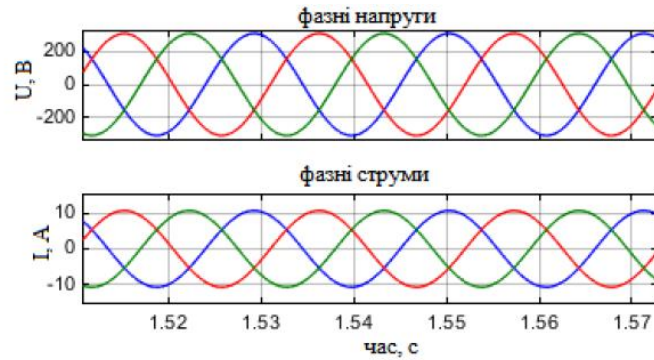


Рисунок 3.3 – Часові залежності фазних струмів і напруг генератора при навантаженні 10 кВт

Рисунок 3.4 ілюструє зміни в часі частоти обертання ротора, електромагнітного моменту генератора та коефіцієнта використання енергії вітру.

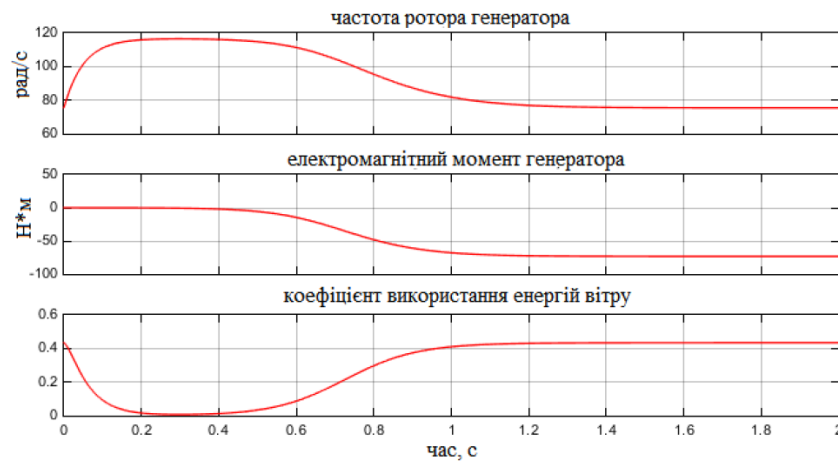


Рисунок 3.4 – Часові залежності частоти обертання ротора, електромагнітного моменту генератора та коефіцієнта використання енергії вітру.

З рис. 3.4 видно, що при навантаженні $R = 10$ кВт і ємності компенсаційних конденсаторів $C = 119$ мкФ на фазу частота ротора стабілізується на рівні 74,5 рад/с приблизно при $t = 1,4$ с. У сталому режимі

електромагнітний момент генератора дорівнює механічному моменту вітрового колеса, що свідчить про роботу установки з максимальною потужністю. Коефіцієнт використання енергії вітру поступово зростає й наближається до свого максимального значення 0,43. Початково високе значення КВЕВ при $t = 0$ с пояснюється встановленими початковими параметрами моделі асинхронного генератора.

3.3 Дослідження роботи вітроустановки за умов змінних вхідних параметрів

На рис. 3.5 представлено результати моделювання роботи вітроустановки при змінній швидкості вітру. Під час дослідження було розглянуто вплив коливань швидкості повітряного потоку на параметри роботи системи. Усі інші вхідні дані залишилися такими ж, як і в попередньому експерименті. Це дозволяє порівняти результати та оцінити ефективність роботи установки за різних умов вітрового навантаження.

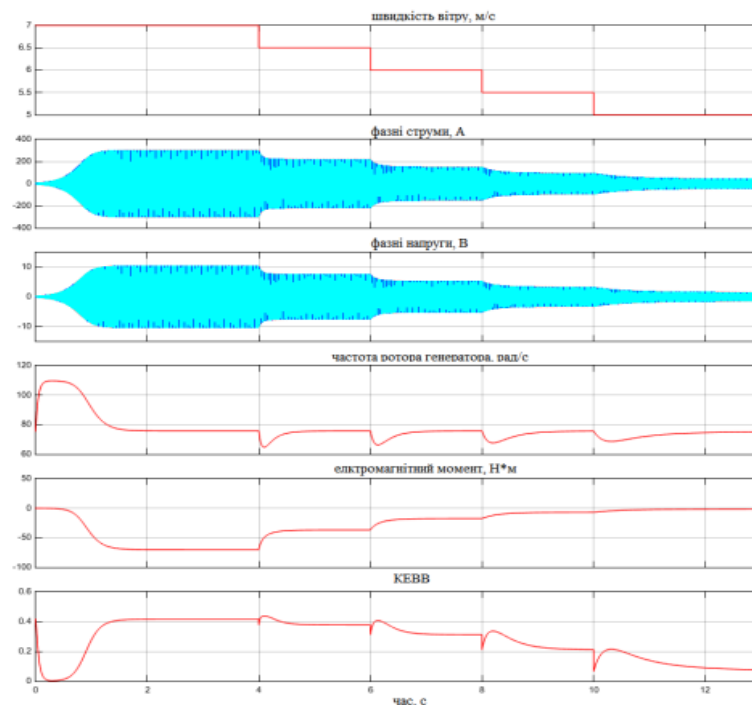
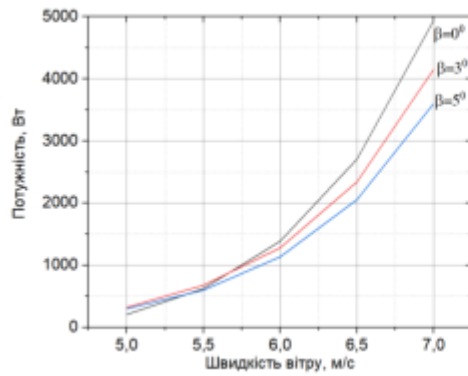


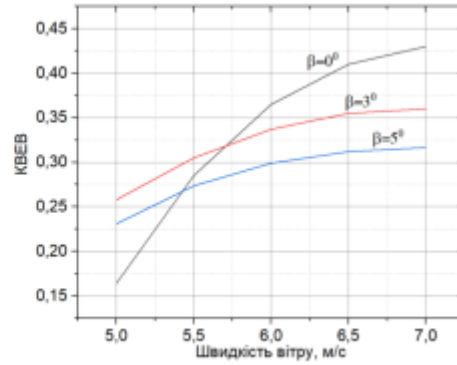
Рисунок 3.5 – Результати моделювання роботи вітроустановки за умов змінної швидкості вітру, що відображають зміну основних параметрів системи при коливаннях повітряного потоку.

На графіках показано, як зміна швидкості вітру впливає на електричні характеристики генератора та загальну стабільність роботи установки. Представлені результати дозволяють оцінити реакцію системи на динамічні зміни вхідних параметрів і визначити ефективність функціонування вітроустановки в реальних умовах експлуатації.

На верхньому графіку зображено зміну швидкості вітру, яка має ступінчастий характер зі збільшенням або зменшенням на 0,5 м/с через кожні 2 секунди. Наступні два графіки демонструють поведінку фазних і лінійних напруг, з яких видно, що зі зниженням швидкості вітру зменшуються амплітуди струмів і напруг; при швидкості 5 м/с вони становлять відповідно 50 В і 1,5 А. Для стабілізації вихідної напруги асинхронного генератора можна змінювати магнітний потік, що досягається регулюванням ємності конденсаторів, використанням керованих реакторів або нелінійних конденсаторів, а також підмагнічуванням осердя статора. З четвертого графіка видно, що частота ротора залишається сталою на усталених ділянках, а стрибкоподібні зміни спостерігаються лише під час коливань швидкості вітру. У реальних умовах експлуатації, коли швидкість вітру часто змінюється, варто очікувати варіацій не лише напруги й струму, а й частоти. На нижньому графіку подано зміну коефіцієнта використання енергії вітру, який зменшується зі спадом швидкості повітряного потоку та досягає максимуму при найвищих швидкостях. Максимальна ефективність роботи вітроустановки спостерігається в обмеженому діапазоні швидкостей, тоді як при швидкості нижчій за 5 м/с коефіцієнт не перевищує 0,1. Додаткові моделювання проводилися для різних значень кута β , що визначає положення лопаті відносно площини її обертання, а результати наведено на рисунку 3.6.



а)



б)

Рисунок 3.6 – залежність вихідної потужності (а) та коефіцієнта використання енергії вітру (б) від швидкості вітру за різних значень кута β .

Як видно з рис. 3.6 а, зміна кута β на 5° майже не впливає на вихідну потужність вітроустановки при швидкості вітру до 6 м/с, однак при 7 м/с різниця потужності між $\beta = 0^\circ$ і $\beta = 5^\circ$ становить близько 1000 Вт. Збільшення кута β регулює аеродинамічні характеристики вітроколеса, водночас знижуючи коефіцієнт використання енергії вітру, як показано на рис. 3.6 б.

3.4 Методи оптимального керування вітроенергетичними установками за критерієм енергоефективності

Динаміка роботи вітроустановки визначається зміною кінетичної енергії обертових частин вітроколеса та електромагнітної енергії в системі електропостачання, тому для дослідження стійкості доцільно розділяти механічні та електромагнітні процеси за швидкістю протікання. Механічні перехідні процеси через інерційність обертових мас є тривалішими, тоді як електромагнітні проявляються швидко, особливо при різких змінах навантаження. Існують два основні методи керування ВЕУ: регулювання аеродинамічних характеристик вітроколеса та електричного навантаження генератора. Аеродинамічне регулювання, яке включає зміну кута атаки або довжини лопаті, ускладнює конструкцію, збільшує масу та знижує надійність системи. Найбільш перспективним є регулювання навантаження генератора

завдяки простоті, надійності та високій швидкодії електричних і електронних пристроїв управління. Крім того, генератор працює в сприятливих тепловентиляційних умовах і не використовує повністю номінальну потужність через реальні швидкості вітру.

Для забезпечення стійких і енергоефективних режимів роботи ВЕУ доцільно регулювати навантаження з урахуванням характеристик установки, погодних умов та особливостей електроспоживання. Оптимальні значення потужності визначають аналітичним шляхом через кутову швидкість, потужність і момент вітрового колеса при максимальному коефіцієнті використання енергії вітру, що дає залежність $P_{opt} = f(\omega k)$.

$$P_{opt} = \frac{\rho \pi C_{pmax} r^2}{2 \lambda_{opt}^3} \omega_k^3 = k_{opt} \cdot \omega_k^3; \quad (3.4)$$

де λ_{opt} – швидкохідність, при якій досягається максимальний коефіцієнт використання енергії вітру; k_{opt} – оптимальний коефіцієнт вітрового колеса.

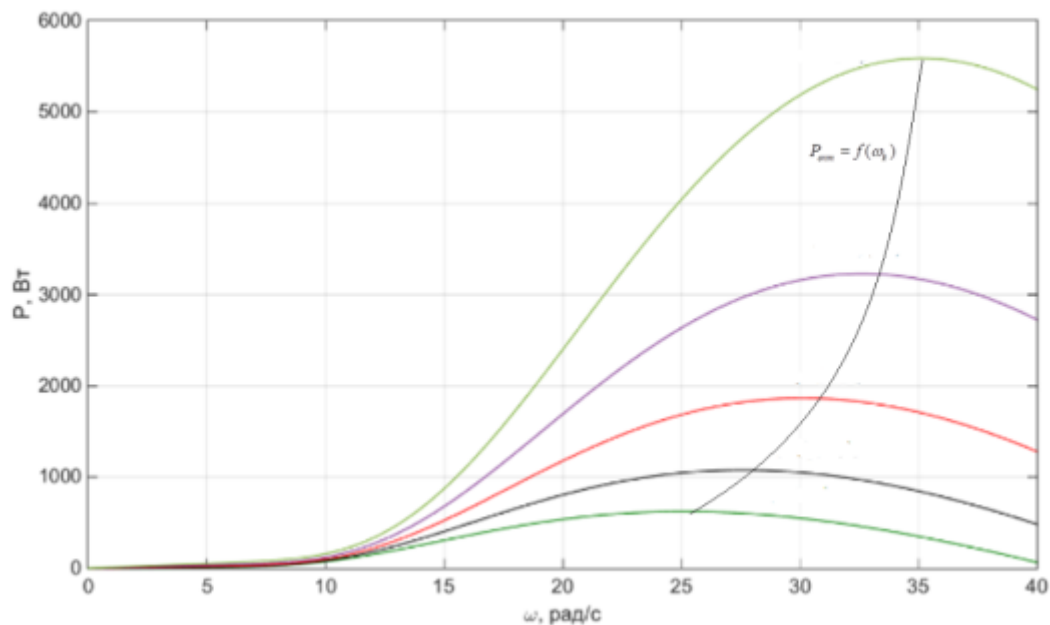


Рисунок 3.7 – Графік залежності оптимальної потужності вітроелектричної установки від частоти обертання вітрового колеса.

Оптимальна кутова швидкість обчислюється за формулою:

$$\omega_k = \frac{\lambda_{opt}}{r} v; \quad (3.5)$$

Алгоритм оптимального режиму передбачає порівняння поточної потужності ВЕУ з оптимальною для даної кутової швидкості вітрового колеса. Якщо поточна потужність менша за оптимальну, вітрове колесо працює у режимі недовантаження, що дозволяє збільшити навантаження. У протилежному випадку ВЕУ розвантажується, щоб уникнути переходу робочої точки на нестійку ділянку характеристики.

Недоліком цього методу є необхідність використання анемометра для визначення оптимальної потужності, що ускладнює конструкцію та підвищує вартість системи. Імітаційна модель ВЕУ з асинхронним генератором дозволяє визначати її електричні характеристики як при постійній, так і при змінній швидкості вітру. Для будь-якої заданої швидкості існує частота обертання ротора, при якій потужність установки буде максимальною, а коефіцієнт ефективності залежить від кута між площиною обертання вітроколеса і хордою лопаті.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля

Система управління охороною праці (СУОП) – це сукупність органів управління підприємством, які на підставі комплексу нормативної документації проводять цілеспрямовану, планомірну діяльність щодо здійснення завдань і функцій управління з метою забезпечення здорових безпечних і високопродуктивних умов праці. За дану частину виробництва відповідає інженер з охорони праці. Головні завдання спеціаліста – створення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці, покращення виробничого побуту, запобігання травматизму і профзахворюванням.

Для забезпечення створення СУОП щорічно розробляються та затверджуються на підприємстві положення про організацію управління охорони праці; щорічно оформляються накази про призначення осіб відповідальних за стан охорони праці на дільницях, а також безпечне використання об'єктів підвищеної небезпеки (котлів, що працюють під тиском, газових та кисневих балонів, пестицидів); оформляються наказ про визначення персональних обов'язків з охорони праці усіх спеціалізацій, керівників дільниць та інших службових осіб; щорічно проводиться паспортизація умов праці, технічних засобів безпеки і технічного стану робочих місць; складаються плани роботи з охорони праці, комплексне, річне і оперативне планування; організовуються заходи матеріального і морального стимулювання щодо охорони праці; проводяться розслідування і вивчення причин травм, пожеж їх аналіз і облік, а також розробляються заходи щодо їх застосування;

Об'єктом управління є діяльність структурних підрозділів та служб підприємства по забезпеченню безпечних і здорових умов праці на робочих місцях, виробничих дільницях, цехах та підприємства в цілому.

4.2 Протипожежна безпека і грозовзахист

Блискавко захист – це комплекс захисних захистів від блискавки, які гарантують безпеку людей, збереження людей і споруд, обладнання та матеріалів від вибухів, загоряння й руйнування. Найпростішими і надійними засобами від блискавки є створення блискавковідводів. Схема блискавкозахисту будівлі показана на рис. 4.1.

Струмопровід виконується сталлю стрічкою перерізом 25...30 мм або дротом не менше 6 мм. Заземлення виконується кутовою сталлю, трубами на відстані від установки не менше 4,5 м. Опір розтікання не повинен перевищувати 15....20 Ом.

Приймаємо початкову висоту блискавковідводу 8 метрів. Визначаємо радіус конуса, в якому ймовірність попадання 95%, через висоту конуса h за формулою (4.1):

$$R_0 = 1.5 \cdot h, \text{ м. } R_0 = 1,5 \cdot 8 = 12 \text{ м.}$$

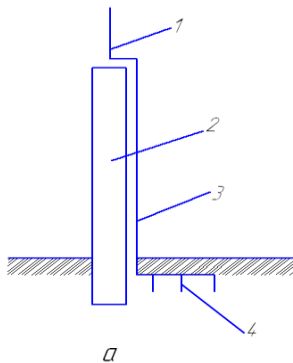


Рисунок 4.1 – Схема блискавко захисту конструкції; 1 – блискавко приймач,
2 – блискавко провідник; 3 – опора, 4 – заземлювач.

Для будинку довжиною L кількість одиночних блискавковідводів визначаємо через радіус конуса R_0 в якому ймовірність попадання 95% за формулою:

$$Nb = \frac{L}{2R_0}, \text{ шт,} \quad Nb = \frac{86}{2 \cdot 4} = 11 \text{ шт.}$$

Усі з'єднання в процесі монтажу системи блискавко захисту (Блискавко приймач – струмовідвід, струмовід – заземлювач) виконують за допомогою зварювання. Болтові з'єднання застосовують лише для тимчасових блискавко захисних пристроїв.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

5.1 Обґрунтування енергоефективності функціонування системи електропостачання на основі вітроелектричної установки

Для проведення економічного аналізу приймається проєкт установки однієї вітроелектричної установки (ВЕУ) потужністю $P_{\text{ном}} = 10$ кВт, призначеної для виробництва електричної енергії та її подальшого використання в локальній енергосистемі підприємства.

Прийняті допущення (стандартні, які можна змінити за потреби):

- Номінальна потужність $P_{\text{ном}}=10$ кВт.
- Середній коефіцієнт використання потужності (capacity factor, CF) — 0,25 (базовий); для альтернативних сценаріїв розгляну $CF = 0.30$ і 0.35 .
- Рік = 8760 год.
- Строк служби — 20 років.
- Загальні капітальні витрати (CAPEX) — 1 200 000 грн (типове значення для мікровітру 10 кВт; можна змінити).
- Розбивка: турбіна 60% (720 тис.), фундамент/монтаж 15% (180 тис.), електрообладнання 10% (120 тис.), автоматика 5% (60 тис.), проєкт/транспорт/пуск 10% (120 тис.).
- Експлуатаційні статті: технічне обслуговування — 4% CAPEX/рік, амортизація — 5% CAPEX/рік, страхування/податки — 1% CAPEX/рік, заробітна плата персоналу — 50 000 грн/рік.
- Дисконтна ставка для NPV — 10%.
- Тариф/ціна заміщеної енергії (базовий) — 6,0 грн/кВт·год (для самоспоживання); у сценаріях також розглядаю 10 грн/кВт·год.

1) Річне виробництво електроенергії

$$E_{річн} = P_{ном} \cdot CF \cdot 8760$$

Для $CF = 0,25$:

$$E_{річн} = 10 \cdot 0,25 \cdot 8760 = 21\,900 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

(Для $CF = 0,30 \rightarrow 26\,280 \text{ кВт} \cdot \text{год}$; $CF = 0,35 \rightarrow 30\,660 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.)

2) Річні експлуатаційні витрати ($C_{експл}$)

Прийняті ставки:

$$ОМ = 4\% \text{ CAPEX} = 0,04 \cdot 1\,200\,000 = 48\,000 \text{ грн/рік}$$

$$\text{Амортизація} = 5\% \text{ CAPEX} = 60\,000 \text{ грн/рік}$$

$$\text{Страхування/інші} = 1\% \text{ CAPEX} = 12\,000 \text{ грн/рік}$$

$$\text{Зарплата персоналу} = 50\,000 \text{ грн/рік}$$

Отже

$$C_{експл} = 48\,000 + 60\,000 + 12\,000 + 50\,000 = 170\,000 \text{ грн/рік}$$

3) Собівартість 1 кВт·год

$$S = \frac{C_{експл}}{E_{річн}} = \frac{170\,000}{21\,900} = 7,76 \text{ грн} / \text{кВт} \cdot \text{год}$$

Отже, при базових допущеннях собівартість $\approx 7,76 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год}$.

Річний дохід і прибуток (за тарифом 6 грн/кВт·год)

Річний дохід:

$$D = E_{річн} \cdot T = 21\,900 \cdot 6 = 131\,400 \text{ грн/рік}$$

Річний прибуток (прибуток = дохід – експл. витрати):

$$P = 131\,400 - 170\,000 = -38\,600 \text{ грн/рік}$$

(тобто – збиток $\sim 38,6$ тис. грн/рік при цих параметрах)

5) NPV та термін окупності (базовий сценарій)

NPV (за 20 років, $r = 10\%$) – для постійного річного прибутку PPP:

$$NPV = \sum_{t=1}^{20} \frac{P}{(1+r)^t} - CAPEX \quad (5.1)$$

При $P = -38\,600$ грн/рік отримуємо $NPV \approx -1\,528\,624$ грн (від'ємне).

Проста (недисконтована) окупність: при негативному річному грошовому потоці окупність не настає.

Подано табл. 5.1 ключових показників для кількох сценаріїв ($CAPEX = 1\,200\,000$ грн, інші витрати як вище, $r = 10\%$, $T = 20$ років).

Таблицю 5.1 – Показники $CAPEX$

Сценарій	CF	$E_{\text{річн}}$ (кВт·год)	Тариф (грн/кВт·год)	$C_{\text{експл}}$ (грн/рік)	Дохід (грн/рік)	Прибуток (грн/рік)	NPV (грн)	Проста окупність
Базовий	0,25	21 900	6,0	170 000	131 400	-38 600	-1 528 624	— (неокупається)
Кращий майданчик	0,30	26 280	6,0	170 000	157 680	-12 320	-1 304 887	—
Вищий тариф	0,25	21 900	10,0	170 000	219 000	49 000	-782 835	~25 років (проста)
Кращий + вищий тариф	0,30	26 280	10,0	170 000	262 800	92 800	-409 941	~13 років (проста)

При тарифі 10 грн NPV залишається від'ємним у наведених допущеннях – це пов'язано з порівняно високим $CAPEX$ для 10-кВт системи та значними амортизаційними/фіксованими витратами. Проста окупність при позитивному грошовому потоці у сценаріях ~13–25 років (очевидно залежить від реального тарифу та субсидій).

Точка беззбитковості (тариф), при якій дохід дорівнює експлуатаційним витратам:

$$T_{BE} = \frac{C_{\text{експл}}}{E_{\text{річн}}} = \frac{170000}{21900} = 7,76 \text{ грн / кВт} \cdot \text{год} \quad (5.2)$$

Отже, щоб проект не мав щорічних збитків при $CF=0.25$, потрібно щоб економічна вигода від 1 кВт·год (або тариф/економія) була $\geq \sim 7,8$ грн/кВт·год. Вплив CF : при підвищенні CF до 0.30 собівартість падає до $\approx 6,47$ грн/кВт·год; при $CF=0.35$ – $\approx 5,54$ грн/кВт·год. Тобто вибір якісного майданчика (кращий вітер) критично впливає. Вплив $CAPEX$: зменшення $CAPEX$ на 20% (до 960 тис.) дасть суттєве покращення NPV /окупності – варто шукати економічні пропозиції/гранти/вітчизняні моделі для зниження початкових витрат.

Отже, при стандартних допущеннях ($CAPEX = 1,2$ млн грн, $CF = 0,25$, тариф 6 грн/кВт·год) експлуатація 10-кВт вітроустановки генерує річний збиток $\approx 38,6$ тис. грн; NPV проекту – від’ємне. Тож проект не є економічно вигідним за цих умов лише з урахуванням прямих фінансових потоків.

Ключові чинники, що визначають економічну доцільність:

- середній ресурс вітру (CF) на місці установки;
- величина $CAPEX$ (вартість самого вітроагрегату + монтажу);
- вартість заміщеної електроенергії (тарифи, економія при самоспоживанні, «зелені» тарифи/відшкодування);
- наявність дотацій, грантів або податкових пільг.

Практичні рекомендації для покращення економіки проекту:

- проводити детальне обстеження вітрового ресурсу (анемометрія) – навіть невелике збільшення CF (наприклад $0,25 \rightarrow 0,30$) суттєво знижує собівартість;
- шукати постачальників/моделі турбін з кращим співвідношенням $CAPEX$ /потужність;
- розглянути гібридні рішення (ВЕУ + сонце + акумулятор), що можуть підвищити частку власного споживання і зменшити втрати;
- аналізувати можливість державної підтримки, «зелених» тарифів або компенсацій;
- зменшити фіксовані витрати (напр., оптимізувати організацію обслуговування, застосувати віддалений моніторинг для зниження зарплатних/операційних витрат).

Як вставити в кваліфікаційну роботу: у розділ економічної частини рекомендую подати: вихідні дані (таблиця), покрокові розрахунки (як вище), таблицю сценаріїв (як у цьому матеріалі), діаграму чутливості (наприклад: NPV залежно від CF та тарифу) та короткі висновки з практичними рекомендаціями.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У кваліфікаційній роботі здійснено всебічні теоретичні та практичні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності перетворення енергії вітру та покращення експлуатаційної надійності вітроелектричних установок. Створено імітаційну модель трилопатевої вітроустановки з асинхронним генератором, що дає можливість досліджувати режими її роботи за різних швидкостей вітру та рівнів навантаження. Встановлено, що оптимальне співвідношення між швидкістю потоку вітру та частотою обертання ротора забезпечує найвищий рівень перетворення енергії, при цьому коефіцієнт використання енергії вітру досягає максимального значення 0,43.

Проведено технічні розрахунки параметрів асинхронного генератора типу АИР 132М8, які підтвердили його придатність для використання у складі малої вітроелектричної установки потужністю 10 кВт. Аеродинамічний аналіз показав, що при діаметрі вітроколеса 7,4 м коефіцієнт потужності становить 0,317, що свідчить про високі енергетичні показники системи. Для забезпечення безперервного електропостачання розроблено схему резервного живлення, яка включає 45 акумуляторних батарей сумарною потужністю 36 кВт.

У роботі також розроблено комплекс заходів із забезпечення безпеки праці під час монтажу, експлуатації та обслуговування вітроустановки, що сприяє зниженню ймовірності аварійних ситуацій.

Економічний аналіз підтвердив ефективність впровадження запропонованих технічних рішень: при орієнтовних інвестиційних витратах 815 тис. грн термін їх окупності становить близько двох років.

Таким чином, результати дослідження доводять, що використання імітаційного моделювання є ефективним інструментом для вдосконалення параметрів вітроелектричних установок, підвищення їх енергоефективності, надійності роботи та економічної обґрунтованості застосування в енергетичному секторі України.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Гальчак В. П., Боярчук В. М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця. Львів: Вид-во ЛНАУ, 2008. 135 с.
2. Гальчак В. П., Дмитрів Г. М. Розрахунок енергетичних параметрів гібридної системи теплопостачання фермерського будинку. Метод. вказівки до виконання курсового проекту. Львів, ЛДАУ, 2005. 36 с.
3. Дудюк Д. Л., Мазепа С. С., Гнатишин Я. М. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб. Львів: "Магнолія 2006", 2008. 188 с.
4. Жуковський С. С., Лабай В. Й. Системи енергопостачання і забезпечення мікроклімату будинків та споруд: Навч. пос. для ВЗО. Львів: Астрономо-геодезичне товариство, 2000. 259 с.
5. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. 984 с.
6. Кудря С. О., Головка В. М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навч. посіб. К.: НТУУ "КПІ", 2011. 184 с.
7. Малярєнко В. А. Основи теплофізики будівель та енергозбереження. Підручник. 2-е видання. Х.: Видавництво САГА, 2010. 484 с.
8. Малярєнко В.А. Енергетичні установки. Загальний курс. Х.: В-во САГША, 2008. 320 с.
9. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 236 с.
10. <https://uniclimate.com.ua/products/teplovi-nasosy-dlya-pryvatnogo-budynku/cooperhunter-unitherm-3-all-in-one-ch-hp12wtsirk3/>
11. <https://uniclimate.com.ua/wp-content/uploads/2023/02/instrukciya-unitherm3-aio-ua.pdf>

12. https://cooperhunteraircon.com/?gclid=Cj0KCQjw7aqkBhDPArisAKG a0oLWwriPnZqdYFkAdTEGwILGKZiUW6zYhudeqKqlb11QuAZmcjiDyL0aAqml EALw_wcB
13. R. K. Sarojini, K. Palanisamy and E. De Tuglie, “A fuzzy logic- based emulated inertia control to a supercapacitor system to improve inertia in a low inertia grid with renewables,” *Energies*, Vol. 15, no. 4, Article ID 1333, 2022.
14. O. Abdel-Rahim and E. Abdelhameed, “Ultimate transformerless boost DC-DC converter for renewable energy applications,” *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, Vol. 2, no. 2, pp. 63–69, 2021.
15. J. B. Holm-Nielsen, and D. Almakhlles, “A hybrid PV-battery system for ON-grid and OFF-grid applications-controller in loop simulation validation,” *Energies*, Vol. 13, No. 3, P. 755, 2020.
16. V. Burlaka, S. Gulakov, S. Podnebennaya, E. Kudinova, and O. Savenko, “Bidirectional single stage isolated DC-AC converter,” in *Proceedings of the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, PP. 343–346, IEEE, Kharkiv, Ukraine, 2020, October.
17. S. Deshmukh, A. R. Thorat, and I. Korachagaon, “Modelling and analysis of PV standalone system with energy management scheme,” in *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, PP. 1–5, IEEE, Bangalore, India, 2020, July.
18. K. Amer, M. Fakher, S. Ahmad, M. Irhouma, S. Altaibao and E. Salem, “Performance of domestic solar heating system with thermal storage using phase change materials,” *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol. 16, no. 9, PP. 01–11, 2020.
19. E. S. Harsha, R. K. Nema, S. Nema, and R. D. Kulkarni, “Design & Simulation of high gain ratio Bidirectional converter for energy storage applications,” in *Proceedings of the 2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)*, pp. 1–6, IEEE, Keonjhar, India, 2020, July.

20. Y. Nassar, S. Alsadi, K. Amer, A. Yousef, and M. Fakher, “Numerical analysis and optimization of area contribution of the PV cells in the PV/T flat-plate solar air heating collector,” *Solar Energy Research Update*, Vol. 6, PP. 43–50, 2019.