

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

На правах рукопису

Климко Володимир Іванович

УДК 621.311.24:621.548.5

**ВІТРОСОНЯЧНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ
МАЛОПОТУЖНИХ СПОЖИВАЧІВ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник –
доктор технічних наук, професор
Щур Ігор Зенонович

Львів – 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ТА СИСТЕМ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ МАЛОПОТУЖНИХ СПОЖИВАЧІВ НА БАЗІ ВІТРОВИХ І СОНЯЧНИХ УСТАНОВОК В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ ПОНОВЛЮВАНИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ	16
1.1. Аналіз існуючих способів і технічних засобів для використання обмеженого вітрового енергоресурсу з метою отримання ЕЕ.....	16
1.1.1. Застосування ВЕУ з ВВО як засобів для генерування ЕЕ з енергії вітру.....	16
1.1.2. Вибір оптимальних аеродинамічних параметрів ВР.....	22
1.1.3. Підвищення енергетичної ефективності ВЕУ з ВВО шляхом концентрації вітрового потоку.	30
1.1.4. Ефективні електромеханічні системи ВЕУ з ВВО	33
1.1.5. Системи керування навантаженням СГПМ у ВЕУ з ВВО	37
1.2. Аналіз існуючих способів і технічних засобів для використання обмеженого сонячного енергоресурсу з метою отримання ЕЕ.....	40
1.2.1. Розрахунок притоку енергії сумарної СР, що надходить на довільно орієнтовану в просторі площину.....	40
1.2.2. Методи розрахунку потужності на виході ФЕУ	43
1.2.3. ФЕУ з системами стеження за сонцем.....	46
1.3. Аналіз конфігурацій ВССЕ та способів їх параметричної оптимізації	48
1.3.1. Конфігурації ВССЕ для електроживлення окремих малопотужних об'єктів.	48
1.3.2. Критерії енергоефективності автономних ВССЕ	51
1.3.3. Способи параметричної оптимізації ВССЕ.....	52
1.4. Висновки до розділу	54

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ ПОНОВЛЮВАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ВІТРУ І СОНЦЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ КОНСТРУКЦІЇ КЕРОВАНОЇ ВІТРОСОНЯЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	56
2.1. Формування інформаційної ЕБМД	56
2.2. Дослідження енергетичних показників регіонального вітрового ресурсу	59
2.3. Дослідження енергетичних показників регіонального сонячного ресурсу	63
2.4. Методика розрахунку питомих кількостей ЕЕ, отримуваної від конкретних ВЕУ з ВВО та ФЕП	66
2.5. Обґрунтування ефективної конструкції керованої вітросонячної установки завдяки її новим можливостям.....	70
2.6. Висновки до розділу	76
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ТА ПАРАМЕТРИЧНА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРОВАНИХ ВІТРОСОНЯЧНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ	77
3.1. Розроблення методики техніко-економічної оптимізації параметрів складових елементів керованих ВССЕ	77
3.1.1. Системне моделювання роботи ВССЕ	79
3.1.2. Кошторисний аналіз ВССЕ.....	81
3.1.3. Методика параметричної оптимізації ВССЕ за методом ГА	85
3.2. Автономна ВССЕ та її параметрична оптимізація	88
3.2.1. Алгоритм роботи автономної ВССЕ.....	88
3.2.2. Алгоритм розрахунку критеріїв енергоефективності автономної ВССЕ.....	91
3.2.3. Приклад параметричної оптимізації автономної ВССЕ	94
3.3. Мережева ВССЕ та її параметрична оптимізація	98
3.3.1. Алгоритм роботи мережевої ВССЕ.....	98

3.3.2. Алгоритм розрахунку критеріїв енергоефективності мережевої ВССЕ	100
3.3.3. Приклад параметричної оптимізації мережевої ВССЕ.....	102
3.4. Автономно-мережева ВССЕ та її параметрична оптимізація	105
3.4.2. Алгоритм розрахунку критеріїв енергоефективності автономно-мережевої ВССЕ.....	107
3.4.3. Приклад параметричної оптимізації автономно-мережевої ВССЕ	112
3.5. Висновки до розділу	115
РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ КЕРОВАНОЇ ВІТРОСОНЯЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОКРЕМОГО ОБ’ЄКТА.....	117
4.1. Математичне моделювання та імітаційні дослідження аеродинамічних процесів у ВР з ВВО та стаціонарним КВП	117
4.1.1. Методика математичного моделювання аеродинамічних процесів з використанням CFD	118
4.1.2. Математичне моделювання статичних і динамічних режимів роботи Н-ротора для макетного взірця ВЕУ з ВВО.....	120
4.1.3. Математичне моделювання статичних і динамічних режимів роботи Н-ротора з КВП та оптимізація параметрів КВП для макетного взірця ВЕУ з ВВО.....	127
4.1.4. Математичне моделювання аеродинамічних процесів для ВЕУ з ВВО номінальною потужністю 5 кВт	134
4.1.5. Математичне моделювання аеродинамічних процесів для ВР з ВВО в поєднанні з КВП, який переведено в режим захисту ...	135
4.1.6. Створення та експериментальні дослідження макетного взірця ВР з ВВО та КВП	136

4.2. Математичне моделювання і дослідження з метою створення системи автоматичного керування вітросонячною установкою для автономного електрозабезпечення.....	140
4.2.1. Обґрунтування ефективного способу регулювання електричного навантаження СГПМ у ВЕУ з ВВО.....	141
4.2.2. Обґрунтування ефективних способів орієнтації ФЕП на сонце.....	157
4.3. Створення макетного взірця та експериментальні дослідження блока генераторів для ВЕУ з ВВО	160
4.3.1. Макетний взірець блока генераторів	160
4.3.2. Методика проведення фізичних експериментів та їх результати	163
4.4. Функціональна схема системи керування автономно-мережевою ВССЕ	167
4.5. Висновки до розділу	170
ВИСНОВКИ	172
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	174
ДОДАТКИ.....	196
Додаток А. Номінальні параметри досліджуваних ВЕУ з ВВО та ФЕП.....	197
Додаток Б. Програма розрахунку балансу перетоків ЕЕ між вузлами у автономно-мережевій ВССЕ.....	199
Додаток В. Координати профілю НАСА 0018.....	205
Додаток Г. Акти впровадження	207

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Скорочення, позначення	Пояснення
АБ	Акумуляторна батарея
АВН	Активний випрямляч напруги
АГ	Асинхронний генератор
ВВО	Вертикальна вісь обертання
ВЕУ	Вітроенергетична установка
ВР	Вітроротор
ВССЕ	Вітросонячна система електроживлення
ГА	Генетичні алгоритми
ГЕН	Графік електричного навантаження
ГВО	Горизонтальна вісь обертання
ДЕЛ	Двонаправлений лічильник електроенергії
ДЛЕ	Двобічний лічильник електроенергії
ЕЕ	Електрична енергія
ЕБМД	Електронна база метеорологічних даних
ЕПМЕТ	Електромагнітний перетворювач механічної енергії в теплоту
КВП	Концентратор вітрового потоку
ПДЕ	Поновлювані джерела енергії
СЕМ	Система енергетичного менеджменту
СПІМ	Синхронний генератор з постійними магнітами
СР	Сонячна радіація
ТВМП	Точка відбору максимальної потужності
ФЕП	Фотоелектрична панель
ФЕУ	Фотоелектрична установка
ЦМЖ	Централізована мережа електроживлення
CFD	Computational Fluid Dynamics (комп'ютерне

Скорочення, позначення	Пояснення
	моделювання аеродинамічних процесів)
COE	Cost of Energy (ціна електроенергії)
COS	Cost of the System (ціна системи)
DPSP	Deficiency of Power Supply Probability (імовірність втрати електроживлення)
DOD	Depth of Discharge (максимальна відносна глибина розряду АБ)
NASA	National Advisory Committee for Aeronautics (національний консультативний комітет з повітроплавання)
REPG	Relative Excess Power Generated (надлишкова згенерована електроенергія)
TIOES	Total Income of Energy Sold (загальний прибуток від продажу електроенергії)

ВСТУП

Екологічна та енергетична кризи зумовлюють актуальність пошуку нових способів генерування електричної енергії (ЕЕ) або ж удосконалення уже існуючих. Оскільки Європейський Союз поставив перед собою завдання забезпечити 20% генерування ЕЕ з альтернативних джерел енергії до 2020 р., то Україна як держава, що прагне до вступу в європейську зону, також не повинна відставати в цьому плані.

Відповідно до спеціальної доповіді міжурядової групи експертів щодо зміни клімату (Кембриджська університетська преса 2012 р.) [121], протягом останніх десятиліть найбільшим в галузі альтернативної енергетики є попит на електричні станції та установки, що генерують ЕЕ від енергії вітру та енергії сонячного випромінювання, оскільки такі установки використовують «дружелюбні» поновлювані джерела енергії (ПДЕ) і не спричиняють викидів CO₂ в атмосферу.

Крім великої енергетики, у якій застосовуються потужні вітрові парки та сонячні станції, останнім часом щораз більшої популярності набувають малопотужні вітроелектричні установки (ВЕУ) та фотоелектричні установки (ФЕУ), які можуть забезпечувати потреби окремих споживачів ЕЕ, сприяючи тим самим децентралізації її генерування. Особливо ефективною є спільна робота цих пристроїв, оскільки випадкові інтервали їх роботи часто доповнюють один одного, краще забезпечуючи флюктуативні енергетичні потреби споживачів [73, 88, 109]. На основі цих засобів отримання ЕЕ від ПДЕ вітру і сонця, а також засобів нагромадження генерованої енергії створюються вітросонячні системи електроживлення (ВССЕ), які можуть працювати в автономному режимі чи паралельно з централізованою мережею живлення (ЦМЖ) [118]. Такі ВССЕ можуть бути як стаціонарними, так і мобільними.

Таким чином, четверта промислово-технологічна революція, яка відбувається тепер у світі, полягає в тому, що завдяки доступності ПДЕ людство має змогу генерувати свою «зелену» енергію вдома, в офісах, в житлових будинках і потім, при потребі, ділитися нею в «енергетичному інтернеті» [174].

Тому актуальним на сьогоднішній день є використання окремими споживачами установок для отримання ЕЕ саме від енергії вітру та енергії сонячного випромінювання, оскільки останні є загальнодоступними [109].

Актуальність теми. На переважній території України, зокрема в околиці м. Львова, енергетичні потенціали вітру та сонячного випромінювання є низькими, відповідно, середньорічна швидкість вітру є рівною 3,8 м/с, а середньорічна потужність падаючої сонячної радіації (СР) – 102,8 Вт/м². Для роботи в таких умовах необхідно шукати нові підходи до реалізації вітросонячних установок, які би поєднували високу енергетичну ефективність з низькою питомою (на одиницю потужності) вартістю.

Для отримання ЕЕ з низькопотенціального вітру найкраще використовувати прямопривідні ВЕУ з вертикальною віссю обертання (ВВО) та синхронними генераторами з постійними магнітами (СГПМ) [101, 109, 113]. Проте для таких ВЕУ існує проблема поєднання високої швидкохідності і, відповідно, ефективності та компактності вітроротора (ВР) та генератора, зі стартовими можливостями на невеликих швидкостях вітру. Одним із шляхів до вирішення цієї проблеми є застосування концентратора вітрового потоку (КВП) [110]. Останній може виконувати також низку додаткових функцій у вітросонячній установці: несучої конструкції для монтажу ВР та ФЕУ, захисту ВР від вітрів з великою швидкістю тощо. Для збільшення ефективності роботи ФЕУ доцільно застосувати засоби слідкування за сонцем [72]. Розроблення нових конструктивних рішень та обґрунтування раціональних параметрів вітросонячних установок малої потужності зумовлюють актуальність проведення відповідних досліджень.

На базі ВЕУ та ФЕУ в Україні, як правило, встановлюються малопотужні повністю автономні ВССЕ, розраховані на використання віддаленими від ЦМЖ споживачами. В 2015 р. було прийнято відповідний закон [162], який дозволяє окремим споживачам віддавати надлишок ЕЕ, генерованої від ПДЕ вітру та сонця установками з потужністю до 30 кВт, в ЦМЖ за «зеленим» тарифом та отримувати від цього прибуток. Поряд з цими вже традиційними конфігураціями

ВССЕ – автономною і мережевою, як показав попередній аналіз, перспективною останнім часом в Україні виглядає також автономно-мережева конфігурація, коли споживач може отримувати ЕЕ і від вітросонячної установки, і від ЦМЖ, проте не віддає надлишок генерованої ЕЕ в мережу.

Відповісти на запитання щодо ефективності застосування конкретної структури ВССЕ в конкретних метеорологічних умовах Львова для конкретного споживача, а також обґрунтувати оптимальні параметри ВССЕ можна лише на основі детального техніко-економічного аналізу. Останній повинен включати в себе такі складові як обґрунтовані для кожної структури ВССЕ критерії ефективності, розроблені алгоритми керування енергопотокami в системі, вартості усіх складових елементів, затрати на їх заміну та експлуатацію протягом терміну служби установки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження проводилися у Національному університеті «Львівська політехніка» відповідно до наукового напрямку Інституту енергетики та систем керування «Ресурсозберігаючі технології та інтелектуальні системи керування в енергозабезпеченні об'єктів економічної діяльності». Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи були використані у процесі виконання держбюджетних науково-дослідних робіт: «Комбінована система автономного електрозабезпечення на базі вітро- і фотоелектричних перетворювачів енергії» (держреєстрація № 0111U001212, 2011-2012 рр.) та «Гібридні автономні вітроенергоустановки, що виробляють теплову та електричну енергії» (держреєстрація № 0113U001358, 2013-2014 рр.).

Мета і завдання дослідження.

Мета роботи – розроблення алгоритмів керування енергопотокami, обґрунтування критеріїв ефективності роботи перспективних структур ВССЕ та створення методики для проведення їх параметричної оптимізації, а також обґрунтування ефективної для роботи в умовах низькопотенціальних ресурсів ПДЕ конструкції вітросонячної установки для реалізації цих систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- сформулювати на основі статистичної інформації погодинну електронну базу метеорологічних даних (ЕБМД) та проаналізувати регіональний вітровий та сонячний ресурси ПДЕ;
- розробити на основі ЕБМД методику і відповідне програмне забезпечення для розрахунку поточних питомих значень ЕЕ, що отримується від вітру і сонця за допомогою ВЕУ та ФЕУ з конкретними параметрами;
- обґрунтувати для кожної з перспективних структур ВССЕ цільові функції оптимізації та розробити алгоритми керування енергопотоками на вищому рівні;
- створити методичне та програмне забезпечення для здійснення багатопараметричної оптимізації елементів ВССЕ на основі методу генетичних алгоритмів (ГА);
- обґрунтувати ефективну конструкцію малопотужної вітросонячної установки для електрозабезпечення в умовах низькопотенціальних ресурсів вітру і сонця;
- здійснити математичне моделювання та провести дослідження аеродинамічних процесів з метою обґрунтування раціональних параметрів ВР з КВП для ВЕУ з ВВО;
- дослідити енергетичну ефективність різних способів відбору потужності від СГПМ у ВЕУ з ВВО, а також запропонувати способи її підвищення;
- дослідити енергетичну ефективність різних способів наведення фотоелектричних панелей (ФЕП) на сонце і обґрунтувати раціональний для використання у м. Львові та його околиці;
- виготовити макетний взірець запропонованої ВЕУ з ВВО в поєднанні з КВП та провести його натурні експериментальні дослідження.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії вітру та сонячного випромінювання в електричну енергію та керування потужностями у ВССЕ.

Предметом дослідження алгоритми роботи ВССЕ, критерії їх енергоефективності та параметрична оптимізація, а також обґрунтування

ефективної для роботи в умовах низькопотенціальних ресурсів ПДЕ конструкції керованої вітросонячної установки.

Методи дослідження. Методи розв'язання алгебраїчних рівнянь, математичного аналізу і лінійної алгебри; метод імітаційного моделювання; метод генетичних алгоритмів; метод скінченних елементів; методи комп'ютерного симулювання у програмному середовищі MATLAB/Simulink; систематизація та обробка даних у Microsoft Excel; методи експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Запропоновано нову структуру комбінованої системи електроживлення окремого об'єкта з використанням електроенергії, що отримується від поновлюваних джерел енергії вітру і сонця та від централізованої електричної мережі, а також розроблено для неї систему керування енергопотоками на вищому рівні, що забезпечує безперервне та економічно вигідне електричне живлення споживача за мінімальної ємності чи повного виключення з системи акумуляторних батарей.

2. Обґрунтовано цільові функції енергоефективності для трьох принципово різних структур вітросонячних систем електроживлення окремих об'єктів з відповідними алгоритмами керування енергопотоками та розроблено метод параметричної оптимізації цих систем з використанням генетичних алгоритмів, що дає змогу створювати ефективні системи електрозабезпечення для конкретних споживачів з різними рівнями електроспоживання.

3. Розроблено новий активно-пасивний метод керування електричним навантаженням СГПМ у ВЕУ, який полягає в регульованому відборі потужності від генератора через діодний міст та підвищувальний DC-DC-перетворювач на малих швидкостях вітру, а на середніх та великих регулювання відбувається пасивним способом, коли генератор безпосередньо навантажується через діодний міст на проміжну ланку постійної напруги оптимальної величини, що дає змогу відбирати практично максимальну потужність від вітру в усьому робочому діапазоні зміни його швидкості, використовуючи електронний перетворювач лише на третину потужності ВЕУ.

4. Вперше для м. Львова визначено уточнені річні та сезонні оптимальні кути нахилу фотоелектричних панелей до горизонту при двокоординатному і азимутальному способах їх стеження за сонцем та при орієнтації стаціонарно розміщених панелей строго на південь на основі погодинної інформації про відносні тривалості сонячного сьйва в інтервалах істинного часу, що дає змогу підвищити енергетичну ефективність роботи сонячних фотоелектричних установок.

Практичне значення одержаних результатів.

Сформована погодинна ЕБМД може бути використана в подальших наукових дослідженнях, спрямованих на ефективне використання ПДЕ у м. Львові.

Розроблені методика та відповідне програмне забезпечення дають змогу оперативно визначати оптимальні параметри ВССЕ для споживачів з різними рівнями електроживлення та конкретними графіками енергоспоживання.

Запропонована нова енергоефективна для умов з низькопотенціальними ПДЕ конструкція вітросонячної установки, що складається з ВЕУ з ВВО та симетричного нерухомого КВП, а також з ФЕП із поворотним механізмом для азимутального їх стеження за сонцем, може бути використана як складова частина ВССЕ для забезпечення енергетичних потреб споживача.

Новий розроблений пристрій – електромагнітний перетворювач механічної енергії в теплову (ЕПМЕТ), дає змогу підвищити кількість отримуваної від вітру енергії в малопотужних автономних ВЕУ з ВВО та використати її у вигляді теплоти, необхідної для побутових потреб.

Результати проведених в роботі досліджень використовуються в науково-дослідних роботах, що виконуються в СКБ електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка», ПП «ЕКО-СТ» для створення систем електроживлення на базі вітрових і сонячних установок, а також у навчальному процесі кафедри «Електропривод та комп'ютеризовані електромеханічні системи» Львівської політехніки.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У друкованих працях, які опубліковані у співавторстві, автору належать: [189] – формування ЕБМД та для отримання максимуму ЕЕ на виході з ФЕП, знаходження оптимального річного кута нахилу панелі до горизонту; [190] – розроблення на основі системного моделювання елементів ВССЕ алгоритмів розрахунку показників енергопостачання та критерію енергоефективності; [164] – порівняння між собою різних способів наведення ФЕП на сонце та знаходження оптимальних річних та сезонних кутів нахилу ФЕП до горизонту; [132] – проведення досліджень енергетичної ефективності низки систем керування навантаженням СГПМ у ВЕУ і обґрунтування комбінованого способу керування; [92] – розроблення математичної моделі геометричних співвідношень у конструкції ЕПМЕТ; [169] – обґрунтування використання теплового генератора для перетворення механічної енергії ВР в теплоту; [171] – проведення математичного моделювання аеродинамічних процесів, що відбуваються під час обертання ВЕУ з ВВО, та обґрунтування ефективної конструкції стаціонарного КВП у складі ВЕУ; [187] – розроблення методики розрахунку показників електропостачання окремого об’єкта від гібридної ВССЕ; [165] – розроблення інтелектуальної системи керування електропостачанням окремого об’єкта від ЦМЖ та ПДЕ.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи, результати досліджень та висновки доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на науково-технічних конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Альтернативна енергетика, новітні електротехнології та інтелектуальні управляючі системи в АПК» (м. Київ, 2012); IV Міжнародна конференція молодих вчених «Енергетика та системи керування (EPES-2013)» (м. Львів, 2013); XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика (ICPEES-2014)» (м. Кременчук, 2014); Міжнародна наукова конференція «International Journal of Arts and Sciences conference. Multidisciplinary conferences in a "study abroad" format (IJAS-2015)» (м. Бостон,

США, 2015); XXIV Seminarium Naukowo-Techniczne «Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych» (Rybro, Польща, 2015); VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективність, ресурсоощадність і використання відновлюваних джерел енергії» (м. Дубляни, 2015).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць (з них 1 одноосібно), серед яких 2 статті у фахових виданнях України з технічних наук (з них 1 індексується в міжнародних наукових базах даних), 3 статті у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 2 індексується в міжнародних наукових базах даних, в тому числі 1 в базі Scopus), 1 патент України на винахід, 1 патент України на корисну модель та три тези доповідей.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ТА СИСТЕМ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ МАЛОПОТУЖНИХ СПОЖИВАЧІВ НА БАЗІ ВІТРОВИХ І СОНЯЧНИХ УСТАНОВОК В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ ПОНОВЛЮВАНИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

Через сезонні, періодичні та погодні флуктуації генерування ЕЕ з використанням лише одного ПДЕ важко безперервно забезпечувати енергетичні потреби споживача [28, 45]. Тому такі установки разом з пристроями нагромадження ЕЕ – акумуляторними батареями (АБ) та іншими резервними джерелами генерування ЕЕ такими як ЦМЖ, дизель-генераторні установки та ін. – можуть бути об'єднані в одну ВССЕ [73, 88, 109]. Така система вже може забезпечити усі енергетичні потреби споживача в будь-який момент часу.

Нещодавно Верховною Радою України було внесено деякі поправки до закону України «Про електроенергетику», відповідно до яких споживачі приватних домогосподарств можуть віддавати генеровану надлишкову ЕЕ від ПДЕ вітру та сонця в ЦМЖ і отримувати від цього прибуток, проте встановлена потужність таких установок не повинна перевищувати 30 кВт. Цей факт підтверджує актуальність використання ВССЕ на території України, а також спонукає до створення ефективних надійних систем електроживлення.

1.1. Аналіз існуючих способів і технічних засобів для використання обмеженого вітрового енергоресурсу з метою отримання ЕЕ

1.1.1. Застосування ВЕУ з ВВО як засобів для генерування ЕЕ з енергії вітру. У ВССЕ одним із каналів генерування ЕЕ є ВЕУ, які можуть бути двох конструктивно різних типів – з горизонтальною віссю обертання (ГВО) та з ВВО [185]. Як перші, так і другі широко застосовуються в світі, проте ВЕУ з ГВО мають найбільший попит у великій електроенергетиці, де вони є складовими вітрових парків, що генерують ЕЕ в загальнодержавну чи навіть у світову

енергосистему, а також можуть забезпечувати ЕЕ окремі містечка, поселення, острови тощо. Відповідно до статистичної інформації станом на 2013 р., поданої в [122], світовими лідерами в цій галузі є Китай, США, Німеччина та Іспанія.

Для ВССЕ малопотужних споживачів, які розташовані в густозаселених районах, більш доцільним, в порівнянні з ВЕУ з ГВО, є використання ВЕУ з ВВО. На це вказує низка переваг використання ВЕУ з ВВО над ВЕУ з ГВО, а саме:

- можливість приймати вітер з будь-якої сторони, що виключає потребу в механізмах повороту ВЕУ до набігаючого вітропотoku [153];
- відсутність редуктора для передачі механічної енергії обертового руху з валу ВВО на вал генератора [185];
- можливість встановлення генератора у нижній частині установки, що тісно пов'язано з економічністю та простотою обслуговування;
- легкість монтажу (дахи будинків, подвір'я, автозаправні станції, палуби кораблів);
- нижча вартість виробництва в порівнянні з ВЕУ з ГВО [127];
- простота виготовлення лопатей з постійним аеродинамічним профілем в порівнянні з лопатями для ВЕУ з ГВО, які мають бути конічними та скрученими для досягнення бажаної оптимальної продуктивності [67];
- краща робота в турбулентних вітрових режимах [26];
- можливість роботи на малих вітрах;
- виключення потреби проведення досліджень вітрового кадастру для встановлення ВЕУ (для встановлення ВЕУ з ГВО такі дослідження можуть тривати роками);
- малі шуми під час роботи, що є актуальним питанням в густонаселених районах [105];
- значно менша ймовірність стробоскопічного ефекту, що негативно впливає на людей та тварин (він є поширеним явищем у ВЕУ з ГВО та викликаний створенням тіней лопатями вітроколеса);
- відсутність негативного впливу на міграції птахів.

Серед ВР з ВВО найпопулярнішими є три основних типи [99] (рис. 1.1): ротор Савоніуса, ротор Дар'є, ротор Н-типу (ротор Дар'є з прямими лопатями).

Принцип роботи ВР Савоніуса базується на різниці сил опору [153] між ввігнутою та випуклою частинами його лопатей [39]. ВР такого типу мають просту та надійну конструкцію і можуть працювати на різних швидкостях вітру. Ротор Савоніуса є малошумним, а також має хороші стартові характеристики і може працювати як на дахах будинків, так і на вулицях [136]. Тим не менш, через те, що принцип роботи ВР базується на різниці сил опору, ротори Савоніуса мають низький коефіцієнт відбору потужності від вітру, і це значення відповідає лише третині ліміту Бетца (59,3%) [93], а також малу швидкохідність, що зумовлює великі розміри генератора у випадку прямого приводу, або необхідність застосування підвищувального механічного редуктора (мультиплікатора).

Як ротор Дар'є, так і Н-ротор обертаються за рахунок сил тяги, зумовлених підйомними силами, що діють на їхні аеродинамічні профілі [153]. Ці ротори не вирізняються надто високими значеннями коефіцієнта відбору потужності від вітру, проте ці коефіцієнти є значно вищими, ніж у ротора Савоніуса [52]. Але через те, що в Н-роторі використовуються прямі, а не вигнуті профілі, він, в порівнянні з класичним ротором Дар'є, є простішим у виготовленні та надійнішим, а також його легше транспортувати, наприклад, від місця виготовлення до місця встановлення.

Через простоту виконання та надійність у роботі найбільшим попитом користуються ротори Н-типу [3, 27, 113]. Такі ротори можуть бути як однолопатеві так і багатолопатеві, але найбільш вживаними на сьогоднішній день є трилопатеві ротори, оскільки вони мають оптимальне для невеликих швидкостей вітру поєднання стартових та робочих характеристик [62]. Крім того, трилопатеві Н-ротори є більш швидкохідними в порівнянні з роторами Савоніуса, а тому електричні генератори можуть безпосередньо з'єднуватися з ВР, формуючи прямий привід, що спрощує конструкцію ВЕУ, підвищує її стартові можливості та надійність роботи. Для покращення стартових характеристик Н-ротора можуть використовуватися гелікоподібні лопаті [9], проте процес їх

виробництва є важчим та дорожчим, і якщо мова йде про мінімальний термін окупності, як один із критеріїв економічності установки, то Н-ротори з прямими лопатями є значно привабливішими.

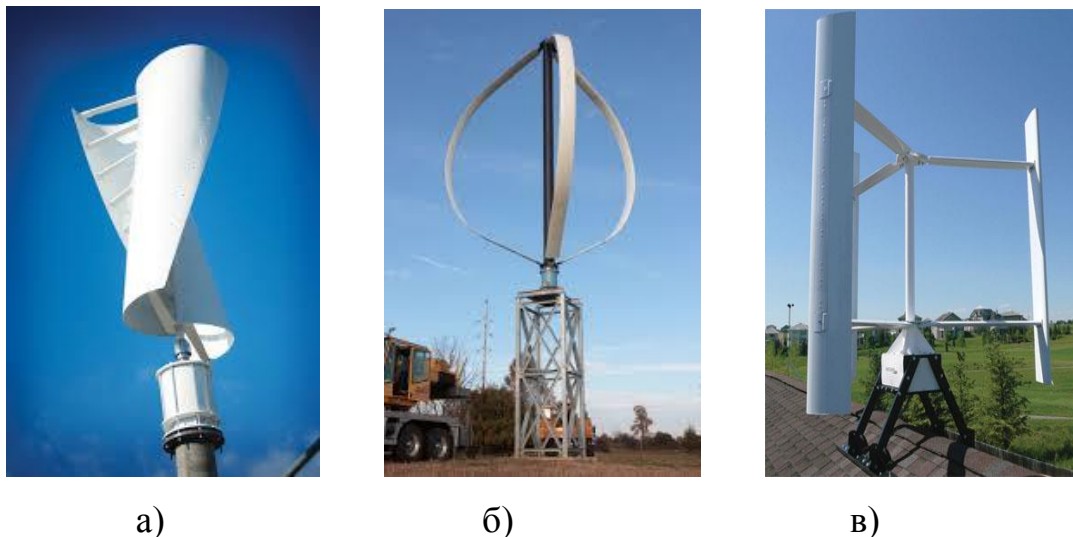


Рис. 1.1. Основні типи роторів з ВВО [103]:

а) ротор Савоніуса, б) ротор Дар'є, в) Н-ротор

Таким чином, саме ротори Н-типу з прямими лопатями можуть бути використані у ВЕУ з ВВО для генерування ЕЕ з енергії вітру у Львівській області, що характеризується незначним вітровим потенціалом.

Важливою, з точки зору енергетичної ефективності, є оцінка вихідної потужності ВЕУ та вихідного моменту ВЕУ. Відповідно до [188], потужність на виході з ВЕУ з ВВО можна розрахувати за наступним співвідношенням:

$$P_{\text{ВЕУ}} = 0,5 \rho_{\text{п}} A C_{\text{р}}(\lambda) V_{\text{В}}^3, \quad (1.1)$$

де $\rho_{\text{п}}$ – густина повітря, значення якої змінюються в діапазоні 1,2-1,3 кг/м³ в залежності від температури та висоти над рівнем моря;

$A = 2 R H_{\text{ВР}}$ – площа омивання ВР з радіусом лопаті R та висотою $H_{\text{ВР}}$ [161];

$C_{\text{р}}(\lambda)$ – залежність коефіцієнта ефективності відбору ВР потужності вітру, який залежить від конструктивних особливостей ВР, від швидкохідності (наприклад, показана на рис. 1.2);

λ – швидкохідність ВР з ВВО – відношення лінійної швидкості лопаті до швидкості вітру;

V_B – швидкість вітру.

λ можна розрахувати за таким співвідношенням [26]:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_B}, \quad (1.2)$$

де ω – кутова швидкість ВР.

Вихідний механічний момент ВР описується виразом [86]

$$M_{\text{ВЕУ}} = 0,5 \rho_{\text{п}} AR \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} V_B^2. \quad (1.3)$$

Для кожного конкретного ВР є своя залежність $C_p(\lambda)$, яка визначається експериментальним шляхом чи шляхом комп'ютерного моделювання. В оптимальній точці $\lambda_{\text{опт}}$ (рис. 1.2) забезпечується максимальний відбір ВР потужності від вітру, і для кожного значення швидкості вітру є прямо пропорційне їй оптимальне значення кутової швидкості ВР, яке забезпечується системою керування ВЕУ з ВВО.

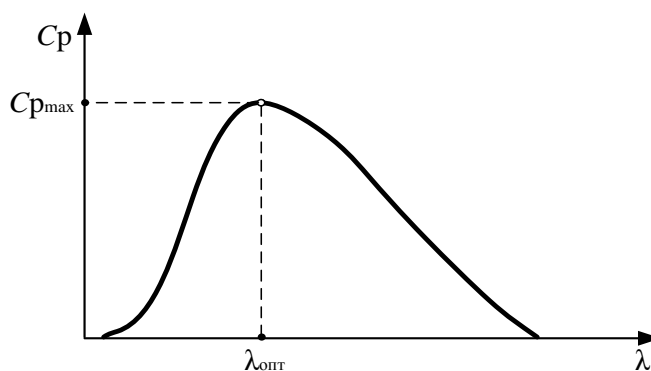


Рис. 1.2. Типова залежність $C_p(\lambda)$ для ВЕУ з ВВО

Згідно [73], швидкість вітру змінюється зі зміною висоти. Якщо висота встановлення ВР $h_{\text{ВР}}$ буде іншою ніж висота, на якій анемометр фіксував

швидкість вітру h_A , то для отримання фактичного значення швидкості вітру на відповідній висоті необхідно скористатись виразом

$$V_{B.BP} = V_{B.A} \cdot \left(\frac{h_{BP}}{h_A} \right)^s, \quad (1.4)$$

де $V_{B.A}$ – швидкість вітру на висоті встановлення анемометра;

s – коефіцієнт шорсткості підстильної поверхні, значення якого коливається від менше ніж 0,10 для дуже плоских поверхонь, води чи льоду до більше ніж 0,25 для лісових ландшафтів [73] (у даному дослідженні s прийнявся рівним 0,2).

Ще однією з найважливіших характеристик ВЕУ з ВВО є залежність вихідної потужності ВЕУ з ВВО від швидкості вітру (рис. 1.3).

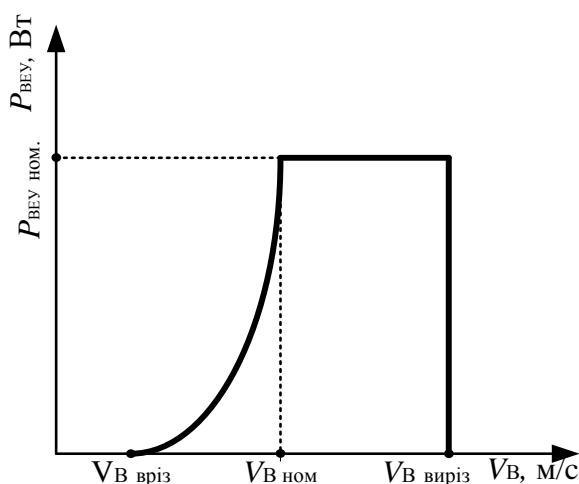


Рис. 1.3. Типова залежність вихідної потужності ВЕУ з ВВО від швидкості вітру

В основному, для ВЕУ з ВВО в діапазоні швидкостей вітру від $V_{B \text{ вріз}}$ (швидкість «врізання») до $V_{B \text{ ном}}$ необхідно здійснювати таке оптимальне механічне навантаження ВР (шляхом електричного навантаження генератора), щоб він за різних швидкостей вітру обертався з оптимальною швидкохідністю, забезпечуючи при цьому максимальний відбір потужності від вітрового потоку. В діапазоні швидкостей вітру від $V_{B \text{ ном}}$ до $V_{B \text{ виріз}}$ необхідно обмежувати вихідну електричну потужність ВЕУ, наприклад, шляхом додаткового механічного гальмування ВР. При збільшенні швидкості вітру понад швидкість «вирізання»

$V_{\text{В виріз}}$ спрацьовує гальмівна система ВЕУ, ВР перестає обертатися і, відповідно, зупиняється процес генерування ЕЕ.

1.1.2. Вибір оптимальних аеродинамічних параметрів ВР. Оскільки ВР приводиться в рух за рахунок обтікання вітром лопатей, що розміщені на ньому, то від правильного вибору геометрії лопатей безпосередньо залежить вихідна потужність ВЕУ. Найчастіше лопаті Н-роторів виготовляють з профілями НАСА [27], які мають добрі аеродинамічні характеристики. Профілі НАСА можуть бути як симетричними [23, 89, 90, 154] так і несиметричними [3, 30, 137]. Використання несиметричних профілів ВР дає змогу покращити їх стартові характеристики, проте часто за рахунок деякого зниження значення C_{Pmax} . Останнім часом великий інтерес до себе викликають гелікоподібні лопаті [9], які виготовляють зі симетричними профілями НАСА, проте вони є скрученими. Профілі НАСА можуть доповнюватися вставками чи вирізами різних форм [3], проте виготовлення таких лопатей є складним та тривалим процесом, тому в більшості випадків використовуються НАСА профілі звичайної форми.

Важливим геометричним параметром Н-роторів є коефіцієнт заповнення (англійською *solidity*), значення якого можна розрахувати за таким співвідношенням [93]:

$$\sigma = \frac{n_{\text{л}} c}{2\pi R}, \quad (1.5)$$

де $n_{\text{л}}$ – кількість лопатей ВР;

c – довжина хорди лопаті ВР.

Від значення коефіцієнта заповнення будуть залежати стартові та робочі характеристики Н-ротора. При більшому значенні σ стартові характеристики покращаться – ВР починатиме свою роботу при нижчій швидкості вітру, зате погіршаться його робочі характеристики – ВР буде менше швидкохідним (знизиться $\lambda_{\text{опт}}$) та зменшиться його коефіцієнт C_{Pmax} [104]. Таким чином, існує проблема оптимального поєднання стартових і робочих характеристик Н-роторів.

Математичне моделювання роботи ВР базується на розрахунку розподілу сил, що діють на його лопаті під час їх обертання [26]. Відповідно до [9], ці сили залежать від двох змінних: 1) результуючої швидкості вітру V_p , що є векторною сумою складових осьової швидкості вітру V_a [67] і набігаючої швидкості повітря $V_{л} = \omega R$, зумовленої лінійною швидкістю обертання лопаті; 2) кута атаки лопаті β (рис. 1.4). Значення як V_p , так і β змінюється зі зміною азимутального кута положення лопаті ψ відносно осі обертання.

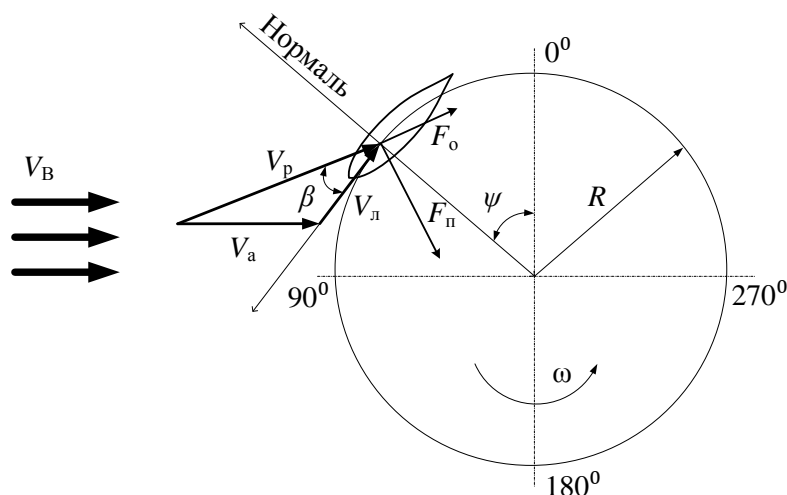


Рис. 1.4. Схема розміщення векторів швидкостей під час обертання Н-ротора з лопатями НАСА

Відповідно під час обертання ВР змінюється і розподіл сил підйомної F_n (lift force) та опору F_o (drag force) (рис. 1.4) [67]. Результуючою цих сил є сила тяги F_p , яку можна розкласти на дві компоненти: нормальну – F_n і тангенціальну – F_t (рис. 1.5). Остання сила і створює крутний момент на валу ВР.

Особливо важливим є кут атаки лопаті ВР β , оскільки від значення цього кута залежатиме розподіл сил, що діють на лопать ВР [154]. Під час обертання лопаті ВР буде змінюватися її азимутальний кут розташування ψ , через який і можна виразити кут атаки лопаті таким рівнянням:

$$\beta = \arctg \frac{\sin \psi}{\lambda + \cos \psi}. \quad (1.6)$$

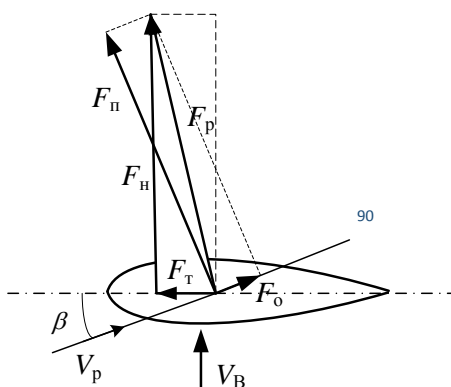


Рис. 1.5. Схема дії аеродинамічних сил на лопать ВР під час його обертання

β має додатні значення при азимутальному розташуванні лопаті в діапазоні азимутальних кутів від 0° до 180° та досягає свого максимального значення, коли $\psi = 90^\circ$ [62]. При перевищенні куту атаки деякого невеликого критичного значення відбуватиметься зрив ламінарного вітропотуку навколо лопаті, і породжені завихрення гальмуватимуть лопать. Цим і пояснюється максимум залежності $C_p(\lambda)$ при досить високій швидкохідності в діапазоні 2,5-4,0, коли швидкість набігаючого вітропотуку значно перевищує реальну швидкість вітру, і, відповідно, кут атаки лопаті не перевищує вказаного критичного значення. Як видно із типових залежностей (рис. 1.6 а,б), для кожного значення числа Рейнольдса настає таке критичне значення кута атаки β , при якому коефіцієнт підйомної сили C_n різко падає, а коефіцієнт сили опору C_o різко зростає.

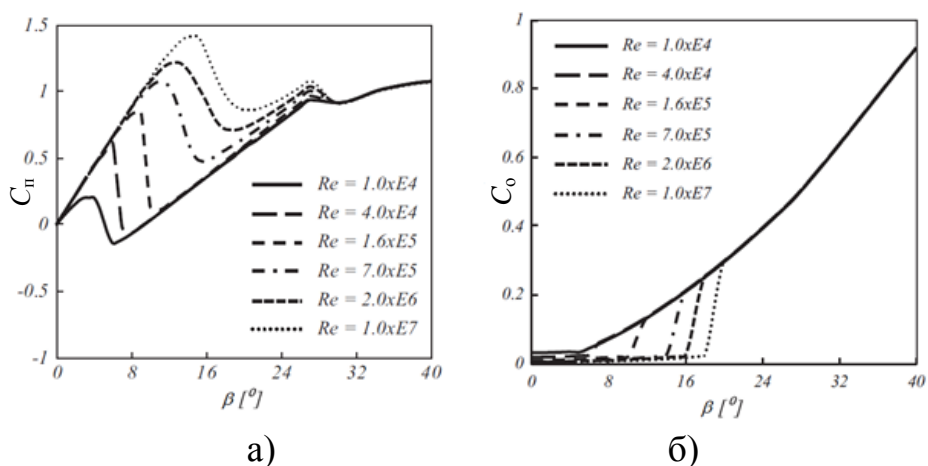


Рис. 1.6. Типові залежності аеродинамічних коефіцієнтів підйомної сили C_n (а) та сили опору C_o (б) від кута атаки β для лопаті з профілем NACA [99]

Залежності, подібні до показаних на рис. 1.6, отримуються експериментальним шляхом та є представленими в спеціальній літературі. Маючи значення кута атаки, можна легко розрахувати коефіцієнти для тангенціальної C_T та нормальної сил C_H за такими виразами [154]:

$$C_H = C_n \cos \beta + C_o \sin \beta, \quad (1.7)$$

$$C_T = C_n \sin \beta + C_o \cos \beta. \quad (1.8)$$

Далі самі значення тангенціальної та нормальної сил, що діють на лопать ВР, можна знайти за наступними співвідношеннями:

$$F_H = \frac{1}{2} C_H \rho_{\text{п}} A_{\text{л}} V_{\text{р}}^2, \quad (1.9)$$

$$F_T = \frac{1}{2} C_T \rho_{\text{п}} A_{\text{л}} V_{\text{р}}^2, \quad (1.10)$$

де $A_{\text{л}}$ – площа лопаті.

Для лопаті, яка обертається, розраховані за виразами (1.9)-(1.10) поточні значення тангенціальної та нормальної сил для кожного азимутального положення лопаті необхідно усереднити за оберт. Наприклад, середнє значення тангенціальної сили $F_{\text{т.сер}}$, створюваної однією лопаттю, становитиме

$$F_{\text{т.сер}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_T(\psi) d\psi. \quad (1.11)$$

Маючи значення $F_{\text{т.сер}}$ для ВР з радіусом R та з кількістю лопатей $n_{\text{л}}$ можна знайти середнє значення крутного моменту на валу ВР за виразом [67]

$$M_{\text{сер}} = n_{\text{л}} F_{\text{т.сер}} R. \quad (1.12)$$

У роботі [137] показано, що вибір оптимального співвідношення висоти ВР H до його діаметра $2R$, так зване AR (Aspect Ratio), крім позитивного ефекту на стартову характеристику ВР, має ще й позитивний ефект на коефіцієнт відбору потужності від вітру C_p . Шляхом математичного моделювання було встановлено,

що оптимальним значенням AR для Н-ротора з несиметричними профілями є значення, яке приблизно рівне 1,0. Проте, результати досліджень, що проводились в [23, 145], показують, що Н-ротори з симетричними профілями НАСА із низьким значенням AR , рівним 0,4, працюють ефективніше від ВР з високим значенням AR , рівним 1,0. Очевидно, що оптимальне значення AR для кожного з ВР є іншим, тому необхідним є проведення математичних моделювань аеродинамічних процесів для вибору оптимального значення AR . Крім того, позитивний ефект на значення C_p має зростання значень числа Рейнольдса для лопатей ВР [145], значення якого можна розрахувати за наступним співвідношенням [23]:

$$Re = \frac{cV_p}{\nu}, \quad (1.13)$$

де ν – кінематична в'язкість речовини (повітря), що обтікає ВР, m^2/s .

Однією з основних проблем Н-роторів з ВВО є те, що вони погано стартують на малих швидкостях вітру [137], тобто за певних значень азимутального кута положення ВР має дуже незначний, або й від'ємний пусковий момент. Для покращення стартових характеристик таких ВР-ів вдаються до багатьох методів, основними з яких є наступні:

- використання аеродинамічних профілів НАСА, що мають несиметричну форму [9, 30];
- збільшення коефіцієнта заповнення ВР σ (збільшення кількості лопатей і/чи довжини їх хорди) [104];
- вибір оптимального співвідношення висоти ВР до його діаметра [137];
- застосування попереднього розкручування ВР за допомогою електрогенератора, який переходить в режим електродвигуна;
- застосування додаткового ВР, наприклад, ВР Савоніуса, встановленого на одному валу з Н-ротором [119, 131].

Показані на рис. 1.4 і рис. 1.5 вектори, а також приведені математичні залежності (1.9)-(1.15) застосовуються до лопаті в цілому, без врахування збурення нею, а також іншими лопатями вітрового потоку, що вносить суттєвий

вплив на перебіг реальних аеродинамічних процесів. Тому використання аналітичних методів, які є поширеними в літературі [18, 144], стає малочисним. Виходячи з цього, отримати адекватні математичні моделі та дослідити роботу ВР можна лише за допомогою сучасних потужних обчислювальних методів, зокрема CFD – Computational Fluid Dynamics (обчислювальна гідро-газодинаміка).

Розрахунок аеродинамічних процесів з використанням CFD.

Найбільше інженерів та науковців у сфері CFD використовує середовище ANSYS [116], що є програмною системою кінцево-елементного аналізу. Звичайно, для отримання реальних результатів ефективності роботи ВР варто провести фізичний експеримент з використанням аеродинамічного тунелю [17, 37], проте це дуже дорогий метод. Тому математичне моделювання з використанням CFD є першочерговим кроком при виборі оптимальних параметрів ВР для ВЕУ з ВВО. Відповідно до [151], найбільш популярним методом, що використовуються в CFD для моделювання нестационарних турбулентних течій, є метод моделювання за усередненими за Рейнольдсом рівняннями Нав'є-Стокса RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Ці рівняння можна подати у вигляді рівняння руху та рівняння нерозривності.

Рівняння руху має наступний вигляд [104]:

$$\rho \frac{\partial \vec{g}}{\partial t} = -\nabla P + \nu \nabla^2 \vec{g}, \quad (1.14)$$

де ρ – густина речовини;

\vec{g} – векторне поле швидкостей;

∇ – оператор Гамільтона;

P – тиск.

Рівняння нерозривності можна записати у наступному вигляді:

$$\nabla \vec{g} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1.15)$$

де $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial y}$, $\frac{\partial w}{\partial z}$ – градієнти швидкостей речовини у напрямках x , y , z відповідно.

Для розрахунку аеродинамічних процесів у ВЕУ з ВВО за допомогою CFD створюються геометричні моделі (рис. 1.7) в програмному середовищі ANSYS, і потім для кожної з зон моделі накладаються граничні умови, що відповідають за потік рідини в через ВР з ВВО [84].

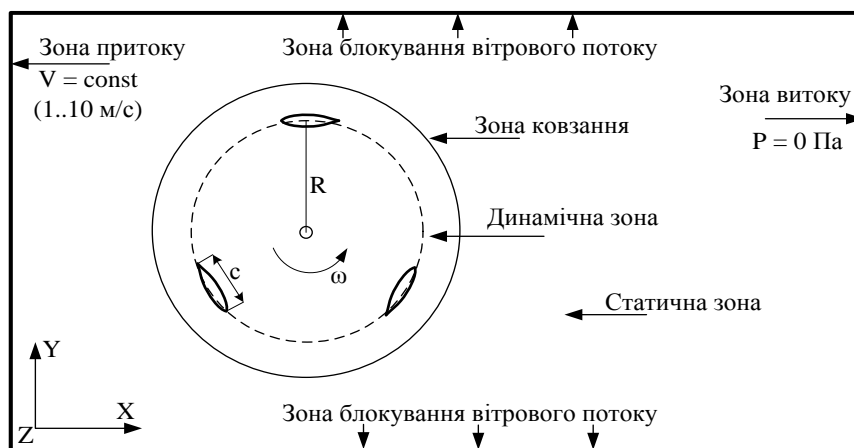


Рис. 1.7. Геометрія та граничні умови моделі для розрахунку аеродинамічних процесів ВР з ВВО за допомогою CFD

У загальному випадку така геометрична модель є математично змодельованим аеродинамічним тунелем, вхід якого на геометричній моделі позначений зоною притоку, вихід – зоною витоку, нижня і верхня стінки – зоною блокування вітрового потоку. Вал ВР разом із трьома лопатями обертається із заданою кутовою швидкістю ω – на геометричній моделі (рис. 1.7) це зображено динамічною зоною. Статична зона окреслена зоною витоку, зоною притоку, зоною блокування вітрового потоку. Статичну та динамічну зону розділяє зона ковзання, яка є дуже вузькою, щоб не впливати на перебіг аеродинамічних процесів під час роботи ВР з ВВО. Як динамічна зона, так і статична зона розбиваються на скінченні елементи, і, чим більша їх кількість, тим точніший буде результат розрахунку.

Є ціла низка різних моделей для розрахунку турбулентних течій, основними з яких є: k - ϵ модель, k - ω модель, SST модель. Згідно з [104], найбільш

рекомендованою для аналізу ВР, що обертаються, є саме k-ε модель. У програмно-моделювальному комплексі ANSYS-Fluent, можна з використанням k-ε моделі турбулентності розрахувати значення крутного моменту на валу Н-ротора, що обертається під впливом набігаючого вітрового потоку. Згідно з [55], вектор моменту відносно осі ВР обчислюється шляхом сумування векторних добутків елементарних векторів сил тиску та в'язкості на їх радіуси-вектори. Останні є відстанями між центрами ваги елементарних частинок поверхні для вищесказаних векторів та віссю обертання ВР. Обчислюється вектор моменту за наступним співвідношенням:

$$\vec{M}(\psi) = \vec{R} \cdot \vec{F}_p(\psi) + \vec{R} \cdot \vec{F}_v(\psi), \quad (1.16)$$

де \vec{F}_p – вектор сили тиску;

\vec{F}_v – вектор сили в'язкості.

Після розрахунку векторних величин моментів та сил, що діють на вал ВР, в програмі проводиться розрахунок миттєвого моментного коефіцієнта відносно осі ВР за таким співвідношенням [104]:

$$C_M(\psi) = \frac{M(\psi)}{\frac{1}{2} \rho_{\text{п}} A R V_B^2}. \quad (1.17)$$

Середнє за оберт значення моментного коефіцієнта можна розрахувати за виразом

$$C_{M, \text{сеп}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_M(\psi) d\psi. \quad (1.18)$$

Тепер, знаючи, з якою кутовою швидкістю (відповідно й швидкохідністю) обертався ВР, та розрахувавши середнє значення моментного коефіцієнта за один повний оберт лопатей ВР згідно з [152], можна розрахувати коефіцієнт відбору потужності від вітру за наступним співвідношенням:

$$C_P(\lambda) = \frac{P}{0,5 \rho_{\text{п}} A V_B^3} = \frac{M_{\text{сеп}}}{0,5 \rho_{\text{п}} A R V_B^2} \cdot \frac{\omega R}{V_B} = C_{M, \text{сеп}} \lambda. \quad (1.19)$$

Як показують власні дослідження та результати інших авторів [84], отримані після комп'ютерного моделювання та обчислення за виразами (1.16)-(1.19) залежності $C_p(\lambda)$ для ВР малих ВЕУ будуть відзначатися меншими значеннями C_p порівняно з ВР з пропорційно збільшеними геометричними розмірами для ВЕУ великих потужностей. Це зумовлено, в першу чергу, збільшенням числа Рейнольдса для лопатей зі зростанням розмірів ВР.

Крім оцінки C_p , отриманої в результаті динамічних моделювань, в ANSYS-Fluent є змога оцінити стартові можливості ВР [90]. Для цього математичне моделювання має проводитися в стаціонарних режимах, де можна отримати значення стартових моментних коефіцієнтів для відповідних азимутальних розташувань лопатей ВР [30, 153]:

$$C_{M, \text{ст}}(\psi) = \frac{M_{\text{ст}}(\psi)}{\frac{1}{2} \rho_{\text{п}} A R V_{\text{В}}^2}, \quad (1.20)$$

де $M_{\text{ст}}(\psi)$ – стартовий момент на валу ВР при відповідному азимутальному розташуванні лопатей ВР ψ .

Як показують публікації останніх років, науковці та інженери і далі продовжують працювати над дослідженням динамічних та статичних полів швидкостей, тисків, створюваних обтіканням ВР вітровими потоками. Такі дослідження дають змогу вибрати оптимальні параметри ВР для ВЕУ з ВВО для забезпечення максимальної енергетичної ефективності. Робота у цьому напрямі є актуальною і на сьогоднішній день, особливо для ВР, що працюють при низьких швидкостях вітру.

1.1.3. Підвищення енергетичної ефективності ВЕУ з ВВО шляхом концентрації вітрового потоку. ВР з ВВО омивається практично безмежним, порівняно з розмірами ВР, вітровим потоком, і частині відпрацьованого вітрового потоку через втрачену початкову швидкість руху важко вийти за межі ВЕУ, не створивши при цьому перешкод для набігаючого вітрового потоку. Це і є однією з причин зниження енергетичної ефективності ВЕУ. Тому для підвищення

енергетичної ефективності ВЕУ з ВВО необхідно забезпечити збільшення швидкості набігаючого вітропотoku в районі ВР, а також створити умови для його виходу за межі ВР [175].

Для вирішення проблем такого роду в останні роки щораз частіше застосовують концентратори вітрового потоку (КВП) (рис. 1.8) [6, 114, 157].



Рис. 1.8. Варіанти конструкцій КВП для підвищення ефективності роботи ВЕУ з ВВО [102]

Відповідно до [146], КВП, захоплюючи потік більшої площі, ніж площа омивання ВР, збільшують його швидкість в зоні омивання ВР, чим зумовлюють збільшення механічного моменту на валу генератора.

Використання концентратора у складі ВЕУ з ВВО є актуальним питанням сьогодення, оскільки в районах, де переважає низькопотенціальний вітер, останні є чи не єдиним варіантом для підвищення ефективності ВЕУ [6]. Так, у роботі [142] показано, що використання КВП дає змогу підвищити коефіцієнт відбору потужності від вітру C_p у 1,8 разів в порівнянні з ВЕУ без концентратора. У роботі [32] результати досліджень, проведених з допомогою CFD моделювання, показують, що використання концентратора сприяє збільшенню крутного моменту на валу ВР, а отже, і вихідної потужності ВЕУ з ВВО. Відповідно до цих

результатів, при наявності концентратора у складі ВЕУ з ВВО кутова швидкість ВР зростає у 1,75 рази, крутний момент ВР та вихідна потужність зростають у 2,88 та 5,8 разів відповідно. У [34], де проводились випробування КВП у аеродинамічній трубі, результати досліджень ще раз показали ефективність використання останніх, а також підтвердили, що концентратори мають позитивний вплив на стартові характеристики ВЕУ. При швидкості вітру 6 м/с, частота обертання ВР зросла на 182%, а вихідна потужність при максимальному крутному моменті – у 3,48 в порівнянні зі значенням для ВЕУ без концентратора.

КВП можуть бути як несиметричними відносно осі обертання і тому поворотними в напрямку до набігаючого вітрового потоку [125, 142], так і симетричними і тому стаціонарними [32, 33, 107, 146].

Застосування поворотних КВП може дати більший ефект порівняно зі стаціонарними, проте зумовлює необхідність в додаткових механізмах та вузлах обертання, що негативно впливає на вартість ВЕУ і, відповідно, термін її окупності, а також на надійність її роботи.

Використання стаціонарних КВП є привабливішим, але, як правило, такі концентратори мають використовуватися в районах, де напрями вітру характеризуються відносною постійністю. У випадку швидкозмінних турбулентних вітрів симетричні стаціонарні КВП використовують, в основному, для ВР малої швидкохідності, які працюють на силі тиску. У цьому випадку КВП дає змогу підвищити приблизно в 1,5 разів значення коефіцієнта C_{Pmax} [31]. Застосування КВП для швидкохідних Н-роторів поки-що мало застосовувалося [175]. Однак такий підхід міг би дати додаткові можливості як щодо підвищення потужності ВЕУ не за рахунок збільшення площі омивання ВР, а за рахунок стаціонарної конструкції КВП, так і щодо покращення досить проблемних стартових властивостей цього типу ВР. Такі дослідження є актуальними з точки зору зниження питомої вартості ВЕУ з ВВО і, відповідно, терміну їх окупності.

Останнім часом появилася ціла низка досліджень щодо вибору оптимальної геометрії КВП для різних типів ВЕУ з ВВО [31, 56, 157], використовуючи метод CFD. Цей метод є єдиним теоретичним для таких досліджень, оскільки дає змогу

отримати непередбачувані напрямки та величини швидкостей потоків вітру, створювані КВП в зоні лопатей ВР. Важливим при розробленні КВП є акцент на збільшення швидкості вітру з потрібним напрямком в тій частині ВР, де створюється позитивна сила тяги, і екранування вітрового потоку – там де, сила тяги є негативною [175].

Зараз практично немає досліджень, пов'язаних з розробленням засобів захисту від шквальних вітрів у ВЕУ з ВВО. Для вирішення цієї задачі було би доцільно використати той же КВП, поклавши на нього додаткові функції.

1.1.4. Ефективні електромеханічні системи ВЕУ з ВВО.

Електромеханічні системи ВЕУ з ВВО можна класифікувати за наступними ознаками:

- за типом генератора, що використовується для перетворення механічної енергії в електричну;
- за видом реалізації трансмісії (редукторні та прямопривідні);
- за типом керування для роботи в точці відбору максимальної потужності (ТВМП) (за відхиленням, за збуренням, комбіноване та інтелектуальне керування);
- за типом системи відбору потужності від генератора (активні та пасивні);
- за характером роботи ВЕУ (автономні та мережеві).

Вибір електромеханічної системи для малопотужних ВЕУ з ВВО повинен відбуватися за наступними критеріями: генератор разом з механічною трансмісією повинен бути простим, надійним та працювати в широкому діапазоні зміни швидкостей вітру; вузли електромеханічної системи повинні бути максимально дешевими; системи керування повинні забезпечувати високу енергетичну ефективність; необхідність технічного обслуговування повинна зводитись до мінімуму.

У малопотужних ВЕУ з ВВО як генератори ЕЕ можуть застосовуватися як машини постійного струму, так і машини змінного струму. Використання електричних машин постійного струму є практично мінімальним, оскільки вони

потребують ретельного догляду під час експлуатації, мають високу вартість, а також вони відзначаються низькими питомими показниками потужності (на одиницю маси і об'єму) [184].

Генератори змінного струму у складі ВЕУ з ВВО конструктивно можуть працювати як з постійною частотою обертання, так і зі змінною частотою обертання. Генератори з постійною частотою обертання, як правило, підключаються безпосередньо до мережі змінного струму. При цьому конструкція електромеханічної системи є найпростішою, проте у цьому випадку ВР ефективно працює у вузькому діапазоні швидкостей вітру, а тому менше відбирає потужності від вітру, швидкість якого в зоні встановлення малих ВЕУ постійно змінюється та є низькою. Робота генераторів змінного струму зі змінною частотою обертання дає змогу, змінюючи електричне навантаження останніх, постійно забезпечувати роботу ВЕУ з ВВО в ТВМП. Проте для цього вже необхідні відповідні силові електронні регулятори електричних координат, які роблять ВЕУ дорожчою.

Застосування асинхронного генератора (АГ) з короткозамкненим ротором з конденсаторним підмагнічуванням у ВЕУ з ВВО (рис. 1.9, а) має низку переваг – низька вартість, простота в обслуговуванні [22], проте йому властиві і недоліки, а саме: незначний діапазон зміни частоти обертання для своєї роботи, необхідність встановлення редуктора для узгодження частоти обертання ВР та ротора АГ, необхідність застосування конденсаторів К для самозбудження [147].

Для розширення діапазону частоти обертання ВР найчастіше застосовують АГ з фазним ротором в режимі машини подвійного живлення (рис. 1.9, б). У такому випадку до обмоток ротора підключається двонаправлений електронний перетворювач (ДЕП) змінної напруги [59]. Від потужності останнього залежить діапазон регулювання швидкості генератора. Тому такі системи широко застосовують у великій вітроенергетиці на ВЕУ мегаватного класу, які працюють на значних та малозмінних швидкостях вітру, і для цього достатньо зміни діапазону частоти обертання ротора до 20-30%. У малих ВЕУ, ефективна робота яких повинна забезпечуватися в широкому діапазоні зміни швидкості вітру,

потужність ДЕП має бути теж значною. Зважаючи на це, а також на необхідність застосування редуктора, для ВЕУ з ВВО така електромеханічна система є неперспективною.

У випадку використання синхронних генераторів (СГ) механічну редукцію легко можна замінити електромеханічною шляхом збільшення полюсів електричної машини, що дає змогу, не дивлячись на збільшення розмірів машини, виключити з конструкції ВЕУ з ВВО механічний редуктор. Це суттєво підвищує надійність роботи ВЕУ та зменшує її стартову швидкість вітру [49].

Електромеханічну систему з СГ з електромагнітним регульованим збудженням (рис. 1.9, в) доцільно застосувати, як і АГ з короткозамкненим ротором, у системах з постійною частотою обертання. Крім цього, недоліками такої системи є низька надійність подачі напруги збудження до ротора та додаткові втрати потужності на збудження, які будуть мати найбільші значення якраз на малих швидкостях вітру, що робить роботу ВЕУ в таких умовах проблематичною.

Іншим варіантом є СГ з магнітоелектричним збудженням – СГПМ (рис. 1.9, г) [8, 58, 105]. Завдяки використанню високоенергетичних постійних магнітів з NdFeB такі генератори можуть мати досить компактні розміри та високу енергетичну ефективність, що робить їх основними у застосуванні в малопотужних ВЕУ з ВВО [24, 57].

Крім можливості максимального спрощення трансмісії, багатополюсні СГПМ характеризуються наступними перевагами [85]:

- мають високий ККД завдяки магнітоелектричному збудженню;
- є простими у виконанні завдяки неперехресним обмоткам якоря;
- характеризуються низьким рівнем шуму;
- є простими у обслуговуванні, а інколи взагалі не потребують обслуговування, що впливає на зменшення терміну окупності установки.

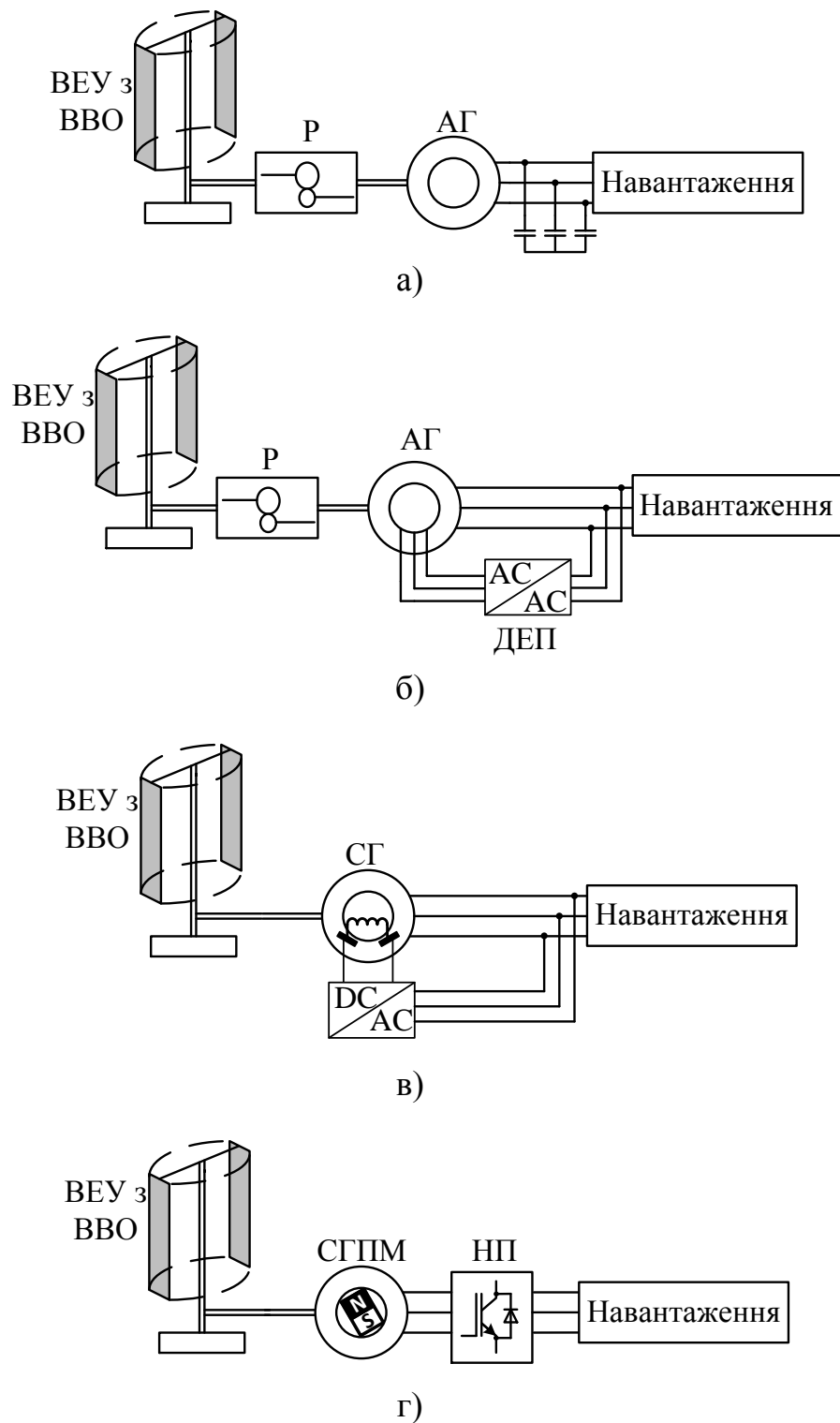


Рис. 1.9. Основні електромеханічні системи з ВЕУ з ВВО

- а) редукторна на базі АГ з короткозамкненим ротором та конденсаторним підмагнічуванням; б) редукторна на базі АГ з фазним ротором в режимі машини подвійного живлення; в) безредукторна на базі СГ з електромагнітним збудженням; г) безредукторна на базі СГПМ

Основними недоліками СГПМ для прямого приводу є значні розміри і вага генератора [49], а також значна вартість через використання високоенергетичних постійних магнітів. Крім цього, в електромеханічній системі ВЕУ з СГПМ вся генерована потужність передається в навантаження через силовий напівпровідниковий перетворювач (НП на рис. 1.9, г), вартість якого суттєво підвищує загальну ціну ВЕУ.

Таким чином, можна зробити висновок, що застосування СГПМ з прямим приводом у складі малопотужних ВЕУ з ВВО є найбільш доцільним технічним рішенням, особливо для густозаселених районів з переважаючими низькопотенціальними вітрами. Проте доцільним є пошук шляхів спрощення, зниження потужності та, відповідно, вартості силового напівпровідникового перетворювача ЕЕ.

1.1.5. Системи керування навантаженням СГПМ у ВЕУ з ВВО. Щоб максимально відібрати потужність від вітру різних швидкостей, необхідно забезпечити пропорційне до даної швидкості вітру значення кутової швидкості ВР, оптимально навантаживши генератор.

Відомі два принципово різні способи регулювання відбору потужності від генератора – пасивні та активні, з використанням напівпровідникових перетворювачів ЕЕ [128, 148]. Останні виконують функцію не тільки регулювання потужності, що відбирається від СГПМ, а й функцію керування споживанням ЕЕ, обслуговування акумуляторних батарей [186].

У пасивних системах регулювання, де, наприклад, СГПМ через діодний міст ДМ навантажений на АБ та активне навантаження Н (рис. 1.10, а), параметри усіх елементів системи ВЕУ (ВР, СГПМ, АБ) розраховані та оптимізовані таким чином, щоб регулювання здійснювалося автоматично під впливом змінної швидкості вітру. При цьому повинна забезпечуватися робота ВЕУ в околі ТВМП [186]. Такі системи відзначаються найнижчою вартістю, проте їх енергетична ефективність не може бути високою у всьому діапазоні зміни швидкості вітру [128].

У активних системах відбору потужності від СГПМ (рис. 1.10, б, в, г) оптимальне регулювання їх роботи здійснюється за допомогою технічних рішень і пристроїв, які, звичайно, ускладнюють конструкцію та збільшують її вартість. Такі пристрої можна поділити на наступні групи: 1) ускладнення конструкції СГПМ з метою забезпечення можливості регулювання їх ЕРС (рис. 1.10, б) [53]; 2) застосування електронних перетворювачів параметрів ЕЕ, які включаються між СГПМ та ланкою постійного струму (рис. 1.10, в, г) [14, 97, 148].

Для регулювання ЕРС обертання розробляють спеціальні гібридні синхронні генератори з постійними магнітами, у яких поєднується магнітоелектричне та електромагнітне збудження [91]. При цьому індуктор і якір знаходяться на статорі, а ротор є пасивним із явно вираженими зубцями. Такі двошарові синхронні машини з постійними магнітами відзначаються високими показниками – питомою потужністю, ККД і надійністю, а також потребують малопотужних пристроїв для керування збудженням. Однак проектування та виготовлення багатополюсних гібридних генераторів є складним, що суттєво підвищує їх вартість в порівнянні з традиційними СГПМ.

Як правило, до складу ВЕУ з СГПМ входять силові напівпровідникові перетворювачі, призначені для регулювання потоку потужності, що відбирається від електричного генератора, а також одночасно для регулювання параметрів отримуваної ЕЕ. Система по відбору потужності від СГПМ з використанням транзисторного активного випрямляча напруги (АВН), для якої потрібно 6 силових транзисторів, є суттєво дорожчою за ту, в якій використовується одно транзисторний DC-DC перетворювач, що може мати різні властивості (понижувальний, підвищувальний чи понижувально-підвищувальний) [148]. Проте, АВН може виконувати три функції: регулювати споживані від СГПМ струми чи потужність, забезпечувати синусоїдальність споживаних струмів та одиничне значення $\cos\varphi$, регулювати (стабілізувати) вихідну напругу [135]. На відміну від АВН, DC-DC-перетворювач не здатний впливати на форму споживаних від СГПМ та спотворених діодним випрямлячем струмів, що приводить до збільшення втрат енергії в генераторі [134].

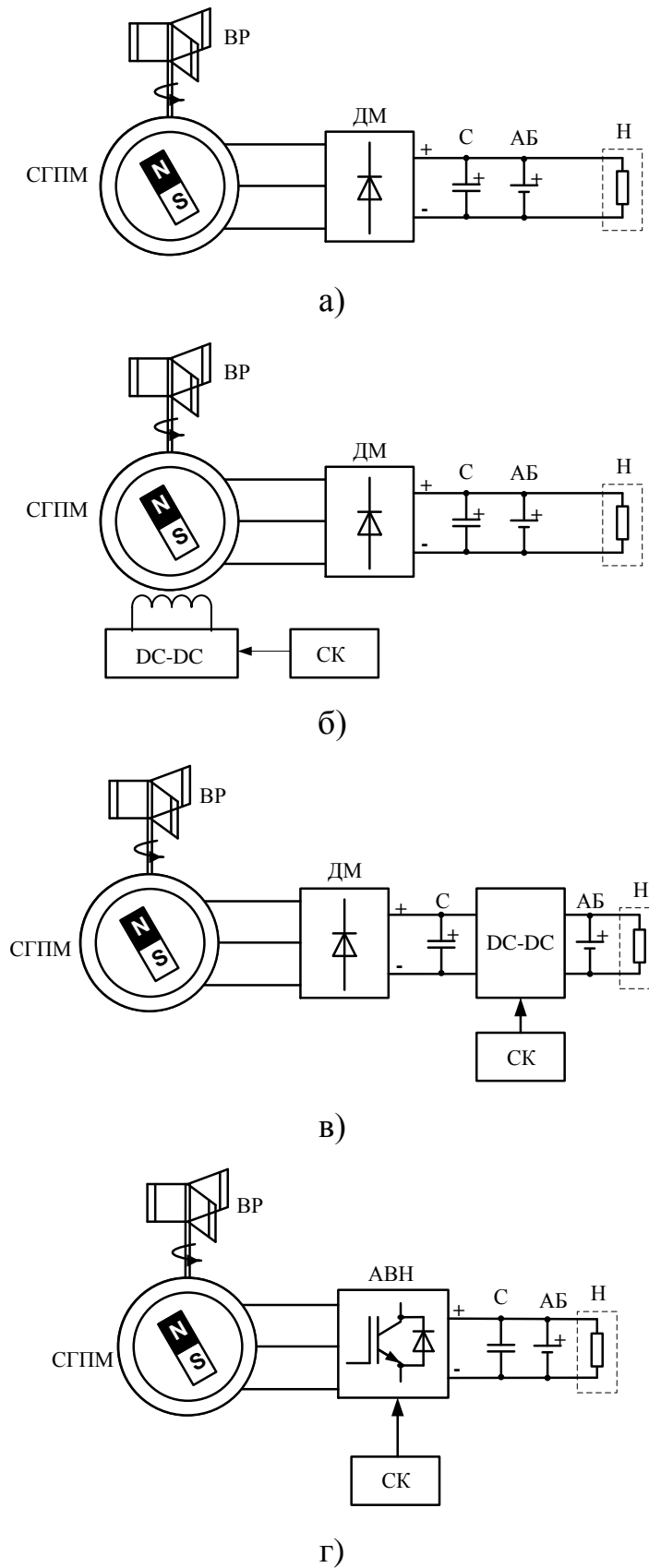


Рис. 1.10. Функціональні схеми різних способів регулювання електричного навантаження СГПМ у ВЕУ з ВВО: а) пасивний; б), в), г) – активні

Таким чином, існує потреба у подальших дослідженнях щодо обґрунтування інших способів відбору потужності від СГПМ, які будуть вирізнятися одночасно простотою та високою енергетичною ефективністю.

1.2. Аналіз існуючих способів і технічних засобів для використання обмеженого сонячного енергоресурсу з метою отримання ЕЕ

Засобами генерування ЕЕ від сонця виступають ФЕП, які можуть бути монокристалічними, полікристалічними, аморфними, органічними. Через те, що монокристалічні ФЕП мають найбільший ККД, їх найбільше використовують в системах електрозабезпечення [167, 178]. Для отримання максимальної кількості ЕЕ від ФЕП в умовах обмеженого регіонального сонячного ресурсу, необхідно проводити відповідні розрахунки, які базуються на різнопланових факторах. Для цього розроблено відповідне теоретичне підґрунтя.

1.2.1. Розрахунок притоку енергії сумарної СР, що надходить на довільно орієнтовану в просторі площину. Величина притоку енергії сумарної СР на ФЕП залежить від місця розміщення та орієнтації панелі, кута її нахилу до горизонту, пори року, часу доби, погоди та низки інших факторів [117]. До складу сумарної СР входить пряма СР, що надходить на світлопоглинаючу поверхню від сонця, та розсіяна небосхилом СР [48]. У похмурі дні розсіяна СР є єдиним джерелом енергії в приземних шарах атмосфери. Навіть незначна кількість генерованої ФЕП ЕЕ в похмурі дні дасть змогу покрити електричні потреби малопотужних споживачів, наприклад: освітлення будинку і території, сигналізація тощо. У багатьох випадках до складу сумарної СР зараховують ще й відбиту СР, але її відсоткове співвідношення є незначним, тому в даному дослідженні нею знехтувано.

Відповідно до [166], питому потужність притоку сумарної СР S [Вт/м²] можна розрахувати за виразом:

$$S = S_{\text{п}} + S_{\text{р}}, \quad (1.21)$$

де $S_{\text{п}}$ та $S_{\text{р}}$ – питомі потужності притоку відповідно прямої і розсіяної СР.

Схему притоків $S_{\text{п}}$ та $S_{\text{р}}$ показано на рис. 1.11.

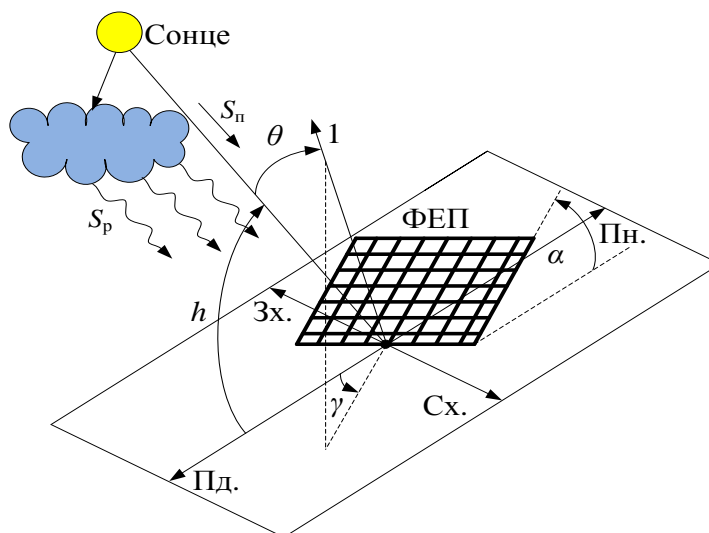


Рис. 1.11. Схема притоків потужностей прямої $S_{\text{п}}$ і розсіяної $S_{\text{р}}$ СР та параметри орієнтації ФЕП відносно горизонтальної площини

Питома потужність притоку прямої СР на орієнтовану довільним чином площину рівна [166]

$$S_{\text{п}} = S_{\text{м}} \cos \theta, \quad (1.22)$$

де $S_{\text{м}}$ – питома потужність притоку прямої СР біля земної поверхні на перпендикулярну до сонячних променів площину;

θ – кут між перпендикуляром до площини та напрямом на сонце.

Оскільки питома потужність притоку прямої СР залежить від товщини атмосфери, через яку проходять промені, то, відповідно до [183], її можна розрахувати за емпіричним виразом

$$S_{\text{м}} = 1085,46 - 194,1 (\sin h)^{-1} + 11,36 (\sin h)^{-2}, \quad (1.23)$$

де $(\sin h)^{-1}$ – відносна повітряна маса (приймає найменше значення, коли сонце

розташовується в зеніті), в. о.;

h – кут висоти сонця (кут, який визначає висоту сонця над горизонтом в даний момент часу, тобто кут між напрямом на сонце з точки спостереження і горизонтальною площиною).

Косинус кута θ розраховується за наступним співвідношенням [159, 176]:

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\varphi \cos\alpha \sin\delta - \cos\varphi \sin\alpha \cos\gamma \sin\delta + \\ & + \sin\alpha \sin\gamma \sin t_r \cos\delta + \cos\varphi \cos\alpha \cos t_r \cos\delta +, \\ & + \sin\varphi \sin\alpha \cos\gamma \cos t_r \cos\delta \end{aligned} \quad (1.24)$$

де φ – географічна широта місцевості, град.;

α – кут нахилу ФЕП (кут між ФЕП і горизонтальною площиною);

δ – схилення сонця (дуга небесного меридіану від небесного екватору до світила, або кут між площиною небесного екватору та напрямком на світило);

γ – азимут (відхилення від меридіана проекції на горизонтальну площину нормалі, проведеної до ФЕП, причому відхилення до заходу від напрямку на південь вважається додатнім, а відхилення до сходу – від’ємним);

t_r – годинний кут, який залежить від конкретної години доби.

Схилення сонця δ визначається за співвідношенням, що подано у [41]:

$$\delta = 23,45 \sin \left[(284 + N) \frac{2\pi}{365} \right], \quad (1.25)$$

де N – порядковий номер дня року (починаючи з 1, що відповідає 1 січня).

Кут висоти сонця h можна обчислити за виразом

$$h = a \sin (\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos t_r). \quad (1.26)$$

Годинний кут t_r можна знайти наступним чином:

$$t_r = (t - 12) \frac{\pi}{12}, \quad (1.27)$$

де t – час доби, год.

Згідно [166], азимут розраховується за співвідношенням

$$\gamma = a \sin \left[\frac{\cos \delta \sin t_{\Gamma}}{\cosh} \right]. \quad (1.28)$$

Потужність притоку розсіяної СР можна розрахувати за виразом [183]

$$S_p = 137,1 - 28,82 (\sin h)^{-1} + 2,27 (\sin h)^{-2}. \quad (1.29)$$

Таким чином, використовуючи вирази (1.21)-(1.29), можна розрахувати потужність притоку сумарної СР на ФЕП, що розташована під заданим кутом нахилу до горизонту та з відповідним орієнтуванням.

1.2.2. Методи розрахунку потужності на виході ФЕУ. Відповідно до алгоритму розрахунку, що представлений в [81], для обчислення потужності на виході з конкретної ФЕУ, панелі якої розташовані під певним кутом нахилу до горизонту, можна скористатись таким виразом:

$$P_{\text{ФЕУ}} = N_{\text{пос}} N_{\text{пар}} U_{\text{н.х}}(t) I_{\text{к.з}}(t) F_{\Phi}, \quad (1.30)$$

де $N_{\text{пос}}$ – кількість ФЕП в установці, які з'єднані послідовно;

$N_{\text{пар}}$ – кількість ФЕП в установці, які з'єднані паралельно;

$U_{\text{н.х}}(t)$ – реальне за конкретної температури і в певний момент часу значення напруги неробочого ходу ФЕП;

$I_{\text{к.з}}(t)$ – реальне за конкретної температури і в певний момент часу значення струму короткого замикання ФЕП;

F_{Φ} – коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики ФЕП, в.о.

$U_{\text{н.х}}(t)$ визначається за стандартним для конкретної ФЕП значенням $U_{\text{н.х.ст}}$ шляхом його коректування на дію конкретної температури:

$$U_{\text{н.х}}(t) = U_{\text{н.х.ст}} - k_{\text{н}} \theta_{\text{р}}(t), \quad (1.31)$$

де $\theta_{\text{р}}(t)$ – реальна на конкретну годину температура ФЕП;

k_n – температурний коефіцієнт напруги неробочого ходу ФЕП.

Значення $\theta_p(t)$ можна отримати за співвідношенням

$$\theta_p(t) = \theta_{н.с}(t) + (\theta_{ном} - 20) \frac{S}{800}, \quad (1.32)$$

де $\theta_{н.с}(t)$ – температура навколишнього середовища;

$\theta_{ном}$ – номінальна робоча температура ФЕП.

Струм короткого замикання ФЕП теж визначається за стандартним для конкретної ФЕП значенням $I_{к.з.ст}$ за виразом

$$I_{к.з}(t) = \left[I_{к.з.ст} + k_i (\theta_p(t) - 25) \right] \frac{S}{1000}, \quad (1.33)$$

де k_i – температурний коефіцієнт струму короткого замикання ФЕП.

Коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики ФЕП (рис. 1.12) можна знайти, скориставшись наступним співвідношенням:

$$F_\Phi = \frac{I_{твмп} U_{твмп}}{I_{к.з.ст} U_{н.х.ст}}, \quad (1.34)$$

де $I_{твмп}$, $U_{твмп}$ – відповідно значення струму і напруги ФЕП у ТВМП.

Для забезпечення максимальної енергетичної ефективності сонячної батареї використовують системи відслідковування ТВМП, які дають змогу отримувати від панелей максимальну при певній інтенсивності сонячного випромінювання і температурі потужність ФЕП [168]. Пошук ТВМП залежить від таких факторів як рівень сонячної радіації, робоча температура панелі, величина струму навантаження [70], а оскільки ці величини постійно змінюються, то необхідним є застосування певного методу чи алгоритму, який буде постійно забезпечувати роботу панелі в ТВМП.

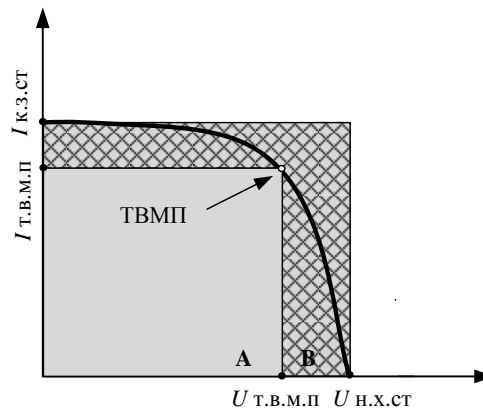


Рис. 1.12. Вольт-амперна характеристика ФЕП і ТВМП

Аналіз показує, що в літературі детально описано велику кількість методів по відслідковуванні ТВМП. Ось деякі з них: метод пошуку ТВМП, що базується на керуванні величиною струму чи напруги на виході панелі [96]; метод сходження [51]; метод випадкових збурень [66]; метод підтримання постійної напруги (струму) [50]; метод зростаючої провідності [4]; метод струмової розгортки [70]; методи пошуку ТВМП з використанням нечіткої логіки, з використанням штучних нейронних мереж, з використанням ГА [120]. Порівняння методів відслідковування ТВМП детально описано в роботах [50, 120]. Оскільки дослідження методів відстеження ТВМП у ФЕП не є завданням цієї роботи, то вважаємо, що роботу панелі у ТВМП забезпечуватиметься за якимось із перелічених методів.

Маючи миттєві значення потужності на виході з ФЕП $P_{\text{ФЕП}}$, можна легко обчислити погодинні кількості генерованої панеллю E_E :

$$E_{\text{ФЕП}} = \int_{t=0}^{t=3600} P_{\text{ФЕП}} dt, \quad (1.35)$$

де t – час в секундах.

Погодинні кількості E_E на виході з ФЕП можна розрахувати і за іншим, простішим методом [73], використавши наступний вираз:

$$E_{\text{ФЕП}} = \eta_{\text{ФЕП}} A_{\text{ФЕП}} W, \quad (1.36)$$

де $\eta_{\text{ФЕП}}$ – енергетична ефективність ФЕП;

$A_{\text{ФЕП}}$ – площа ФЕП;

W – енергія годинного притоку СР на одиницю площі ФЕП.

Згідно методики, викладеної в [166], $\eta_{\text{ФЕП}}$ розраховується за наступним співвідношенням:

$$\eta_{\text{ФЕП}} = \eta_k \eta_t [1 - \mu (\theta_p - 25)], \quad (1.37)$$

де η_k – ККД ФЕП;

η_t – ККД системи відстеження ТВМП, який приймається рівним 1, якщо встановлений ідеальний трекер;

μ – температурний коефіцієнт ФЕП, який приймається сталим (для кремнієвих фотоелементів знаходиться в діапазоні 0,004-0,006 °C⁻¹).

Цей метод (другий) розрахунку кількості ЕЕ на виході з ФЕП є менш точним у порівнянні з першим методом, що викладений у [81], оскільки в ньому не враховуються особливості конкретних ФЕП. Зокрема, використовується загальне для усіх кремнієвих фотоелементів значення ККД та значення температурного коефіцієнта, тоді як для кожної конкретної панелі вони є різними. Крім того, в першому методі розраховуються реальні за конкретної температури значення напруги неробочого ходу та струму короткого замикання ФЕП для подальшого розрахунку кількості ЕЕ на виході з ФЕП.

1.2.3. ФЕУ з системами стеження за сонцем. Відомо, що місце сходу і заходу сонця, а отже, і його азимут протягом року день у день змінюються [123]. Тому лише вибором оптимального кута нахилу ФЕП до горизонту, або й за його посезонної зміни максимум ЕЕ на виході з ФЕП не отримати. ФЕП буде отримувати максимальний притік енергії сумарної СР тоді, коли промені сонця будуть розташовуватися під прямим кутом до панелі. Будь-яке відхилення від такого розташування призведе до зменшення кількості притоку енергії сумарної СР. Тому у різних країнах уже понад 20 років досліджується питання оптимального розташування ФЕП по відношенню до сонця, а також

розв'язуються задачі вибору оптимальної стратегії керуванням ФЕП для забезпечення максимуму ЕЕ на виході панелі.

Як видно з рис. 1.13, орієнтування ФЕП може бути однокоординатним (азимутальним чи меридіальним [129]) та двокоординатним [10, 126]. При таких варіантах орієнтування панелі можлива зміна кута нахилу ФЕП до горизонту, зміна положення ФЕП відносно сонця по осі захід-схід та осі північ-південь.

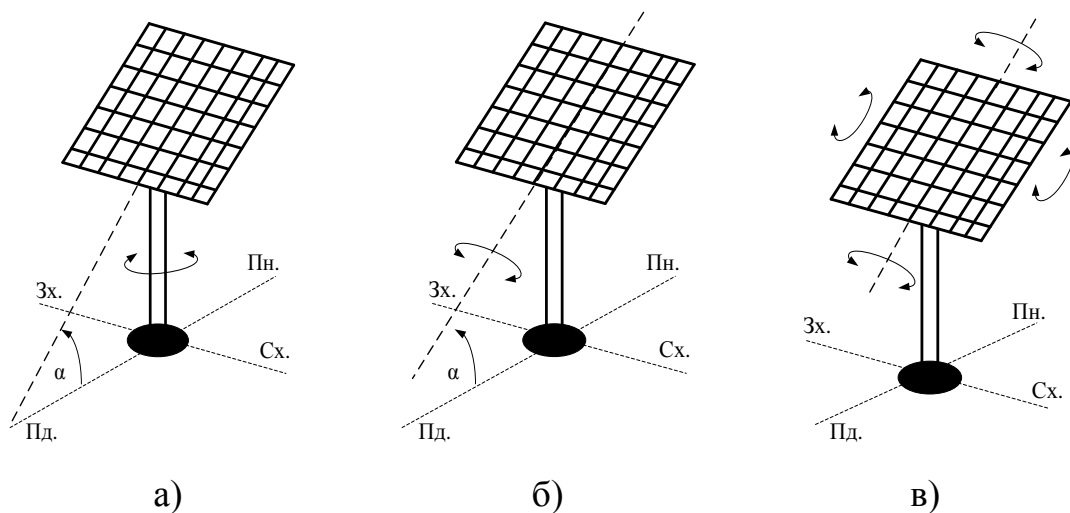


Рис. 1.13. Способи керування положенням ФЕП:

а) азимутальне однокоординатне орієнтування; б) меридіональне однокоординатне орієнтування; в) двокоординатне орієнтування

Однокоординатне орієнтування ФЕП не дає можливості постійно розташовувати ФЕП під прямим кутом до сонячних променів, проте, відповідно до [35], забезпечує збільшення кількостей генерованої ЕЕ на виході з панелі на 25-30% порівняно з оптимально розміщеною нерухомою панеллю. В свою чергу, двокоординатне орієнтування ФЕП за сонцем дає змогу збільшити кількість генерованої ЕЕ на виході з панелі на 42,6% в порівнянні з фіксованим розташуванням ФЕП [141].

Ефективність різних способів керування положенням ФЕП залежить не лише від географічного місця розміщення установки, але й від конкретних метеорологічних умов. Тому такі дослідження для м. Львова є актуальними.

1.3. Аналіз конфігурацій ВССЕ та способів їх параметричної оптимізації

1.3.1. Конфігурації ВССЕ для електроживлення окремих малопотужних об'єктів. Комбіноване використання різних ПДЕ для отримання ЕЕ має переваги в стабільності її генерування порівняно з установками, розрахованими на один вид ПДЕ [28, 87]. Відповідно до [78, 94, 106], системи, які складаються з двох і більше джерел генерування ЕЕ, прийнято називати гібридними. Особливий інтерес до таких систем електроживлення є у споживачів ЕЕ, що розміщуються у віддалених районах [11, 60, 83, 139, 158]. Більше того, такі комбіновані системи починають мати великий попит і у власників приватних будинків, котеджів, які хочуть інвестувати в екологію на Землі через використання «чистих» джерел генерування ЕЕ [38, 54].

Для забезпечення безперебійного живлення від ВССЕ останні найчастіше доповнюються електрохімічними акумуляторними батареями (АБ) [28, 36, 75]. АБ застосовуються для нагромадження генерованої надлишкової ЕЕ від ПДЕ та забезпечення нею споживача у періоди відсутності генерування від вітру та сонця, наприклад, за відсутності вітру у нічний період доби.

Також відомі гібридні ВССЕ, де третім джерелом генерування ЕЕ є дизельні генератори [21, 40, 61, 74, 150], паливні комірки [5, 44, 149, 155], а також гідроелектричні системи [138]. Третє джерело генерування ЕЕ хоча і позитивно впливає на надійність системи електроживлення, але його застосування породжує зайві затрати, зумовлює використання складної системи контролю, а інколи є неможливим через умови розташування об'єкта. Останнім часом розвивається ідея використання маховиків ультрависокої швидкості як засобів нагромадження енергії у гібридних ВССЕ [29, 86], проте в порівнянні з АБ вони є значно складнішими та дорожчими.

ВССЕ можуть бути реалізовані у вигляді трьох структур (рис. 1.14):

- автономні ВССЕ;
- мережеві ВССЕ;
- автономно-мережеві ВССЕ.

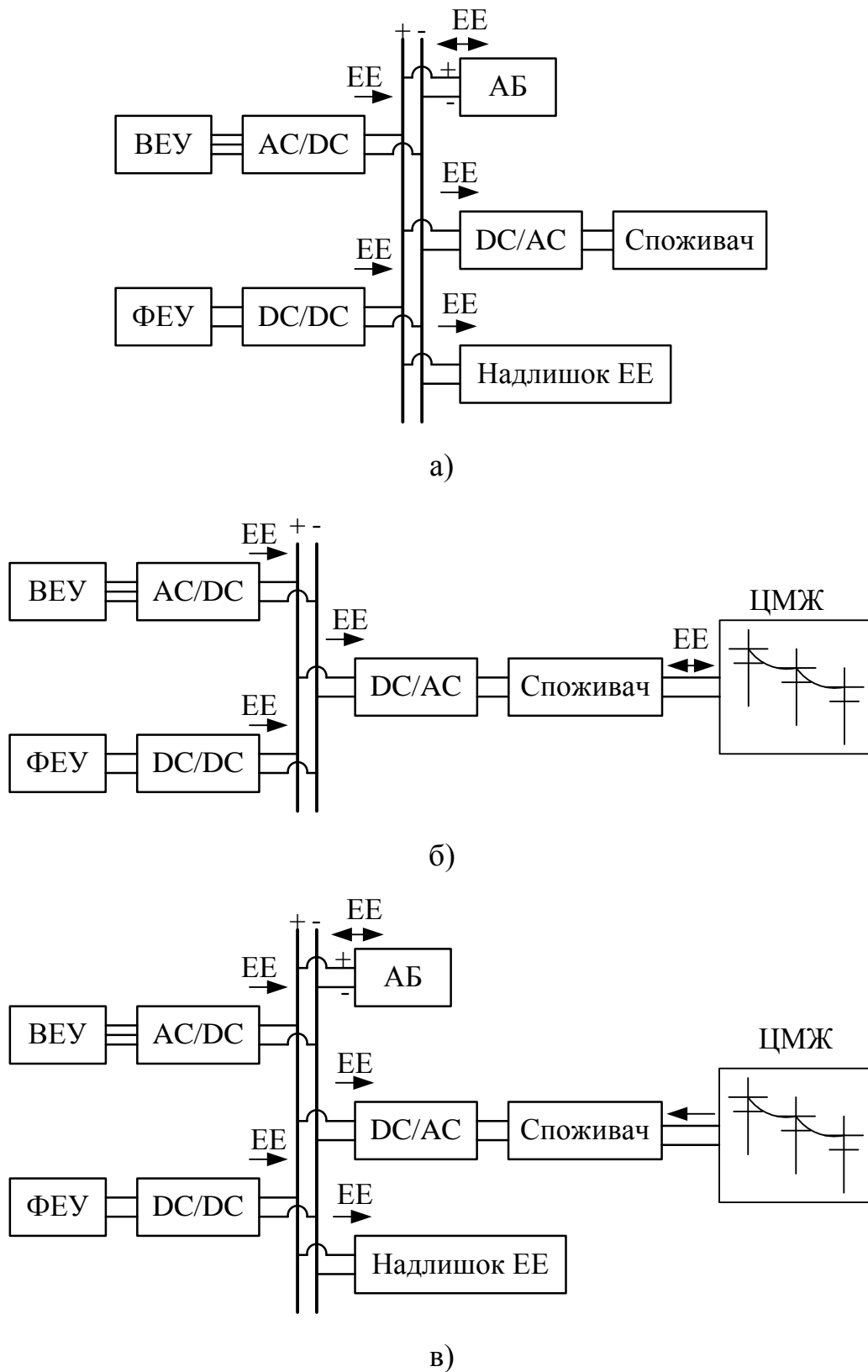


Рис. 1.14. структури СВССЕ:

а) автономна; б) мережева; в) автономно-мережева

Автономні ВССЕ, як правило, використовуються для забезпечення енергетичних потреб споживача у віддалених районах [25], але останнім часом мають попит і у споживачів, що розташовуються у містах та селах [38]. Це зумовлено бажанням останніх інвестувати в «зелену» енергетику, а також отримувати додаткову ЕЕ високої якості.

Використання мережевих установок є актуальним, насамперед, через можливість отримання прибутку від продажу ЕЕ за «зеленим» тарифом [100]. У світі, як правило, у таких системах використовується одне ПДЕ, наприклад, вітер чи сонце. Відповідно до закону України «Про електроенергетику» [162], в Україні для власників приватних домогосподарств є можливість продавати надлишкову генеровану ЕЕ від двох ПДЕ вітру та сонця в ЦМЖ за «зеленим» тарифом. Але оскільки такі системи є ще мало розвиненими в Україні, то є потреба у їх дослідженні та вдосконаленні.

Останнім часом в Україні з'являються споживачі, які, будучи підключеними до ЦМЖ, хочуть також отримувати ЕЕ й від ПДЕ [54, 100]. Насамперед це зумовлено бажанням споживачів збільшити потужність споживаної ЕЕ порівняно з можливою потужністю, що споживається з ЦМЖ та лімітується технічними умовами з енергопостачальними компаніями. Мотивом також є бажанням отримувати безперебійне живлення з одночасним збереженням стандартів якості ЕЕ, які дуже часто не дотримуються, зважаючи на зношеність електрообладнання та обмежену пропускну здатність застарілих електромереж [156]. В літературі немає досліджень, що пов'язані з роботою автономно-мережевих установок, які практично використовують ЦМЖ як резервне джерело живлення. Складність таких систем полягає у поєднанні для отримання великих кількостей ЕЕ різних за природою джерел: ПДЕ, АБ, ЦМЖ. Тому актуальним є розроблення чітких алгоритмів роботи автономно-мережевих ВССЕ для злагодженої роботи енергетичних вузлів системи.

Оскільки ВССЕ складаються з кількох джерел генерування ЕЕ, засобів для її нагромадження, то необхідним є вибір правильної стратегії керування енергетичними перетоками між споживачем та вузлами системи

електроживлення. Як правило, в таких системах для керування енергетичними перетоками потужності застосовують контролери [54, 130]. Крім того, що контролери відповідають за електричні переключення між вузлами ВССЕ, вони ще можуть виконувати функції контролю відбору потужності від ФЕП та ВЕУ з ВВО, тобто забезпечення їхньої роботи в ТВМП [54].

1.3.2. Критерії енергоефективності автономних ВССЕ. Для оцінки енергоефективності ВССЕ необхідно обґрунтувати відповідні критерії, оскільки саме вони вказують наскільки система є надійною та окупною. Відповідно до [19], надійність ВССЕ автономного електрозабезпечення можна оцінити, розрахувавши критерій імовірності втрати живлення DPSP (Deficiency of Power Supply Probability), який виражає імовірність того, що споживачу не буде забезпечене електропостачання. Значення критерію DPSP за рік роботи системи можна виразити за наступним співвідношенням:

$$\text{DPSP} = \frac{\sum_{t=1}^T E_{\text{ДЕФ}}(t)}{\sum_{t=1}^T E_{\text{Н}}(t)}, \quad (1.38)$$

де $E_{\text{ДЕФ}}(t)$ – дефіцитні годинні кількості ЕЕ, кВт·год;

$E_{\text{Н}}(t)$ – сумарні годинні кількості ЕЕ, що споживаються, кВт·год;

$T = 8760$ год – кількість годин в році.

Важливою є також оцінка неспожитої за рік ЕЕ, що була вироблена ВССЕ. В мережевих ВССЕ цю енергію можна віддавати в ЦМЖ. В інших системах її теж можна використати в корисних цілях, наприклад, для обігріву будинку. Проте, враховуючи значно меншу ексергію теплової енергії, порівняно з електричною, це не є добрим рішенням. Тому при правильному підборі параметрів елементів ВССЕ кількість неспожитої за рік ЕЕ повинна бути мінімальною. Відповідно до методики, що викладена у [73], підсумувавши кількість генерованої надлишкової ЕЕ протягом року та знаючи обсяги спожитої ЕЕ протягом року, можна

розрахувати критерій відносної надлишкової генерованої ЕЕ REPG (Relative Excess Power Generated) за наступним співвідношенням:

$$\text{REPG} = \frac{\sum_{t=1}^T E_{\text{НАД}}(t)}{\sum_{t=1}^T E_{\text{Н}}(t)}, \quad (1.39)$$

де $\sum_{t=1}^T E_{\text{НАД}}(t)$ – кількість генерованої надлишкової ЕЕ протягом року, кВт·год.

Але основним критерієм енергоефективності ВССЕ автономного електрозабезпечення є ціна ЕЕ на виході з установки COE (Cost of Energy) [20], яка розраховується за наступним співвідношенням:

$$\text{COE} = \frac{\text{TAC}}{\text{TALE}}, \quad (1.40)$$

де TAC – загальна річна вартість ВССЕ (Total Annualized Cost), \$/рік;

TALE – загальна річна кількість виробленої установкою ЕЕ (Total Annual Load Energy), кВт·год/рік.

Таким чином, маючи цінові характеристики елементів ВССЕ, знаючи графік електричного навантаження (ГЕН) споживача, а також використовуючи метод прогнозування для оцінки вихідної потужності на виході з установки, можна за виразами (1.40)-(1.42) розрахувати критерії енергоефективності системи.

1.3.3. Способи параметричної оптимізації ВССЕ. Одним із основних питань щодо забезпечення окупності ВССЕ є правильно підібрана конфігурація параметрів елементів системи, враховуючи місце розташування об'єкта, а також ГЕН споживача [2]. Для вибору оптимальної конфігурації параметрів елементів ВССЕ можна скористатися методом перебору, але він буде занадто складним, якщо необхідно буде провести оптимізацію більше, як за двома параметрами ВССЕ. Проте варіативними параметрами для оптимізації можуть бути такі: встановлені потужності ВЕУ та ФЕУ, енергетична ємність АБ, кут встановлення ФЕП, висота встановлення ВЕУ з ВВО та інші.

Коли необхідно оперативно прийняти рішення про ту чи іншу конфігурацію параметрів складових елементів ВССЕ застосовують різні методи та оптимізаційно-пошукові процедури. Метод Монте-Карло був використаний у роботі [77] для знаходження показника надійності системи електропостачання. В роботі [29] було описано про розроблену авторами програмувальну модель для мінімізації середньої собівартості виробництва ЕЕ установкою при одночасному задоволенні потреб споживача. За допомогою методики відгуку поверхні RSM (Response Surface Methodology) авторами у роботах [46, 47] також показано приклад знаходження оптимальних параметрів складових елементів ВССЕ. В роботах [63, 71, 111, 112] застосовують селективний метод рою частинок PSO (Particle Swarm Optimization) для пошуку оптимальної конфігурації параметрів складових елементів ВССЕ з мінімальною ціною ЕЕ на виході з неї. Ефективним детермінованим алгоритмом знаходження глобального оптимуму функції, наприклад, ціни на виході з системи, є прямиий алгоритм DA (Direct Algorithm) [15]. Подібним до DA є диференціальний еволюційний алгоритм DEA (Differential Evolutionary Algorithm), за допомогою якого у роботі [2] показано приклад розрахунку критеріїв енергоефективності ВССЕ. Багатокритеріальний еволюційний алгоритм MOEA (Multi-Objective Evolutionary Algorithm) був представлений у роботі [42], де реалізовано оптимізацію за трьома критеріями енергоефективності ВССЕ – ціною установки, дефіцитом ЕЕ, кількістю шкідливих викидів в атмосферу. На основі оптимальності за Парето далі приймалось рішення про оптимальну конфігурацію параметрів складових елементів установки. Порівняно з іншими алгоритмами, MOEA проводить багатокритеріальну оптимізацію, коли інші PSO, DA, DEA проводять однокритеріальну оптимізацію. Але в роботі [42] показано приклад ефективного використання двох алгоритмів для пошуку оптимальної конфігурації параметрів складових елементів ВССЕ. Пошук оптимальних параметрів складових елементів ВССЕ відбувається за алгоритмом MOEA, а вибір стратегії керування відбувається за генетичним алгоритмом ГА (Genetic Algorithm).

Вище згаданий ГА користується найбільшою популярністю серед науковців. Про це свідчать роботи [13, 16, 76, 81, 95, 98, 118], в яких проводиться оптимізація параметрів складових елементів ВССЕ. ГА є стохастичними пошуковими алгоритмами, що покликані розв'язувати задачі пошуку оптимальних рішень [160]. Такі оптимізаційні процедури використовуються під час моделювання реальних процесів в керованих системах електроживлення, наприклад, таких, як ВССЕ, аналізі даних, а також часто там, де необхідно знайти екстремум цільової функції при множині допустимих параметрів. Цільова функція описує якість рішення конкретної задачі. ГА алгоритм дає змогу швидко та з використанням мінімальних комп'ютерних ресурсів знайти оптимальні параметри ВССЕ. Відповідно до [43], якщо проводити такого роду оптимізацію без використання ГА, необхідно затратити десятки років. ГА може бути реалізований як в бінарному виконанні, так і з допомогою програмного комплексу Matlab.

Вищенаведений аналіз методів та алгоритмів оптимізації свідчить про те, що такі методи є необхідним при проведенні параметричної оптимізації ВССЕ.

1.4. Висновки до розділу

1. Генерування ЕЕ від ПДЕ, що реалізовано на основі застосування гібридних ВССЕ, є актуальним на сьогоднішній день не тільки для віддалених споживачів, а й для споживачів, що заживлені від ЦМЖ.

2. Ефективна робота ВССЕ в умовах низькопотенціальних вітру і сонця, що властиво для переважної території України, може бути забезпечена шляхом застосування додаткових засобів для підвищення енергетичної ефективності установок. Для ВЕУ з ВВО – це застосування КВП, а для ФЕУ – застосування механізмів для орієнтації панелей за сонцем.

3. Першочерговим кроком під час побудови ефективної конструкції ВЕУ з ВВО в поєднанні з КВП є математичне моделювання аеродинамічних процесів із застосуванням CFD.

4. Найефективнішою електромеханічною системою для ВЕУ з ВВО є прямопривідна з СГПМ, проте, для забезпечення швидкої окупності цієї системи, необхідно забезпечити простий та енергоефективний метод відбору потужності від генератора та її регулювання.

5. Автономно-мережеві ВССЕ є актуальними для України, проте практично ще не дослідженими щодо умов окупності. Для цього необхідне розроблення чітких алгоритмів їх роботи.

6. Для вибору оптимальних параметрів складових елементів ВССЕ необхідним є проведення параметричної оптимізації з застосуванням оптимізаційних процедур, наприклад, ГА.

Основні завдання даного дослідження представлено у вступі.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ ПОНОВЛЮВАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ВІТРУ І СОНЦЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ КОНСТРУКЦІЇ КЕРОВАНОЇ ВІТРОСОНЯЧНОЇ УСТАНОВКИ

У розділі сформовано електронну інформаційну базу погодинних регіональних метеорологічних даних в середовищах Microsoft Excel та Matlab. На основі ЕБМД проведена оцінка поновлюваних енергетичних ресурсів, а саме вітрового потенціалу та притоку енергії СР у м. Львові. Створено програмний продукт та реалізовано алгоритм для розрахунку кількості отриманої ЕЕ на виході вітросонячної установки з конкретними параметрами та при заданому її розміщенні. За результатами проведених досліджень запропоновано ефективну для регіональних умов конструкцію керованої вітросонячної установки.

Результати досліджень даного розділу опубліковано в роботах автора [164, 170, 189].

2.1. Формування інформаційної ЕБМД

До створеної ЕБМД входить необхідна для розрахунків кількостей ЕЕ на виході вітросонячної установки інформація про швидкість вітру, напрямок вітру, відносну тривалість ясності та хмарності в інтервалах істинного часу, температуру навколишнього середовища.

Погодинні дані про швидкість вітру, його напрям і температуру навколишнього середовища у м. Львові за 2013 р. були отримані з архіву погоди метеостанції (33393 ID), що розташована на території Львівського аеропорту. Статистичні погодинні дані тривалості сонячного сяйва у м. Львові за 2013 р. було отримано в державній службі України з надзвичайних ситуацій, а саме в Львівському обласному центрі з гідрометеорології, де на відповідних дослідницьких метеостанціях проводяться заміри тривалості хмарності та ясності в інтервалах реального часу за допомогою геліографа. Усю інформацію було

отримано у вигляді паперових таблиць, дані з яких було перенесено в електронні таблиці. Фрагмент ЕБМД показано в табл. 2.1, де введено наступні позначення:

t_a – температура навколишнього середовища, °С;

V_B – швидкість вітру, м/с;

$T_{я.i^*}$ – відносна тривалість ясності в інтервалах реального часу, в. о.;

$T_{х.i^*}$ – відносна тривалість хмарності в інтервалах реального часу, в. о.

Таблиця 2.1

Фрагмент електронної бази погодинних метеорологічних даних

Дата	Час	t_a , °С	V_B , м/с	Напрямок вітру	$T_{я.i^*}$, в.о.	$T_{х.i^*}$, в.о.
01.01.2013	4:00	-5	1	Пд.зх.	0	0
01.01.2013	5:00	-6	2	Пд.	0	0
01.01.2013	6:00	-7	2	Пд.–пд.зх.	0	0
01.01.2013	7:00	-4	2	Пд.–пд.зх.	0	0
01.01.2013	8:00	-4	2	Пд.–пд.зх.	0	0
01.01.2013	9:00	-3	3	Пд.–пд.зх.	0,4	0,6
01.01.2013	10:00	1	2	Пд.	1	0
01.01.2013	11:00	3	3	Пд.–пд.зх.	1	0
01.01.2013	12:00	5	4	Пд.–пд.зх.	1	0
01.01.2013	13:00	5	3	Пд.–пд.зх.	1	0
01.01.2013	14:00	6	4	Пд.–пд.зх.	1	0
01.01.2013	15:00	6	4	Пд.–пд.зх.	0,6	0,4

На підставі статистичної інформації, отриманої з ЕБМД, побудовано часові діаграми погодинних значень швидкості вітру (рис. 2.1), погодинних значень температури навколишнього середовища (рис. 2.2) та відносних тривалостей сонячного сйва в інтервалах реального часу (рис. 2.3) у м. Львові за 2013 р.

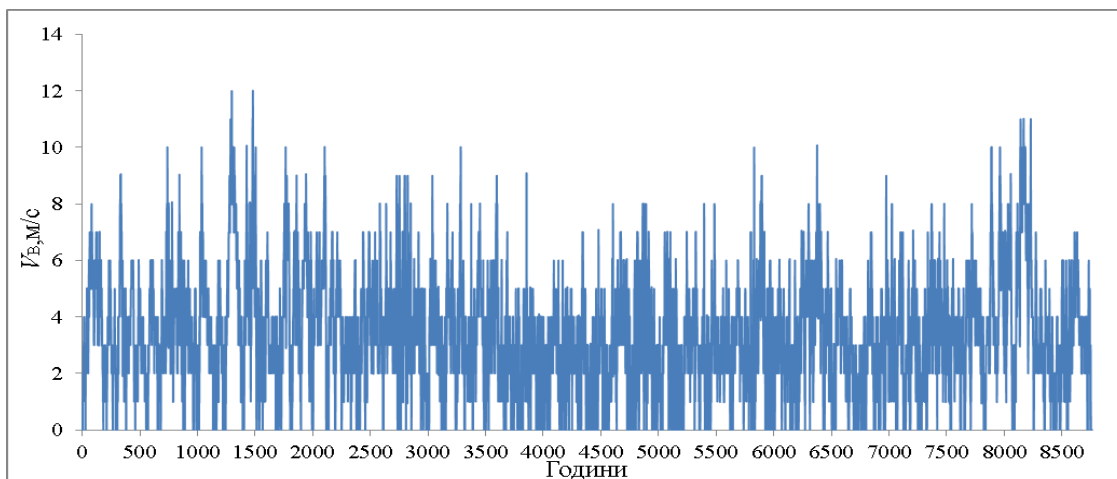


Рис. 2.1. Часова діаграма погодинних значень швидкості вітру у м. Львові за 2013 р.

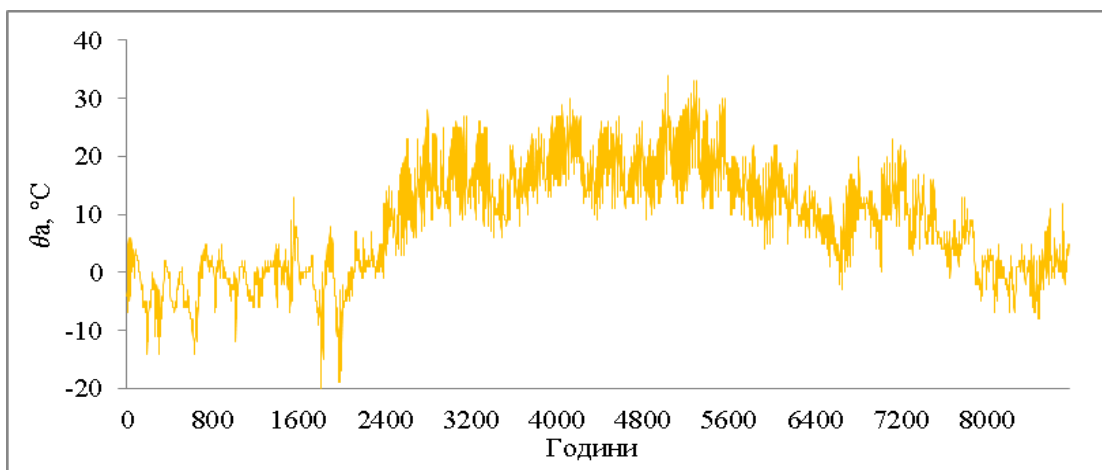
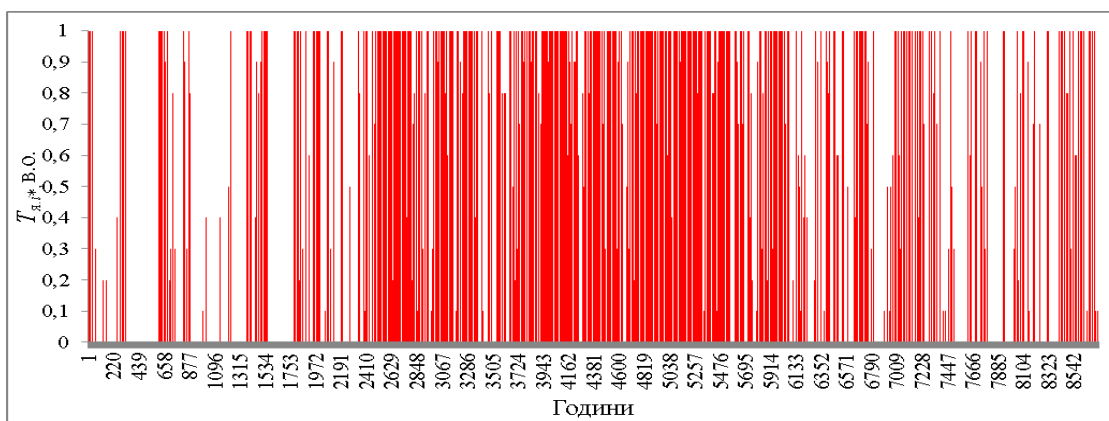
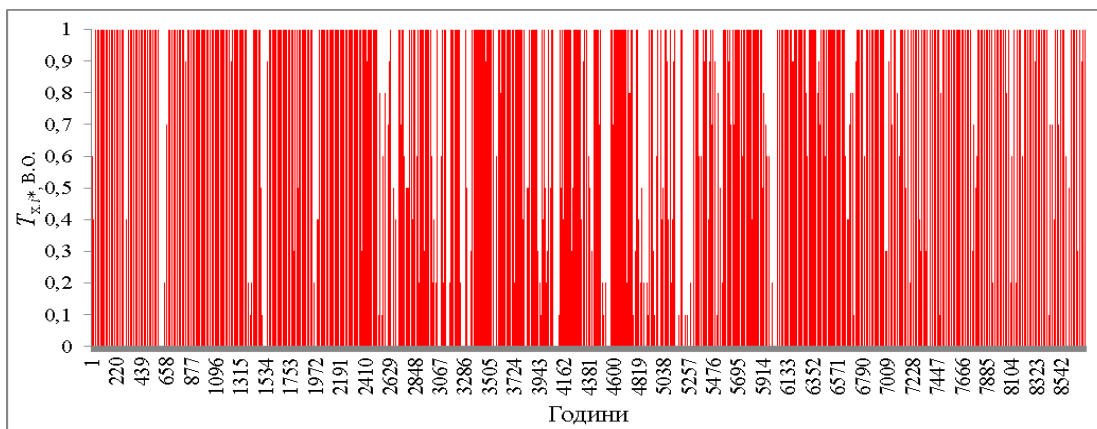


Рис. 2.2. Часова діаграма погодинних значень температури навколишнього середовища у м. Львові за 2013 р.



a)



б)

Рис. 2.3. Часові діаграми погодинних значень відносної тривалості ясності (а) та хмарності (б) в інтервалах реального часу у м. Львові за 2013 р.

2.2. Дослідження енергетичних показників регіонального вітрового ресурсу

Важливою є оцінка вітрового потенціалу території, де буде розміщуватися вітроенергетичний об'єкт. У даному дослідженні погодинні дані про швидкість та напрямок вітру були отримані з показів анемометра, що був розташований на висоті 10 м.

Проаналізувавши рис. 2.1, можна сказати, що швидкість вітру у м. Львові постійно змінюється. Найбільшу швидкість вітер має ранньою весною, а найменшу – влітку. Максимальна годинна швидкість вітру, зафіксована анемометром, складає 12 м/с.

Для оцінки вітроенергетичного потенціалу м. Львова було розраховано наступні енергетичні показники регіонального вітроресурсу:

- розподіл повторюваності швидкості вітру;
- розподіл середньомісячної швидкості вітру;
- тривалість вітрового штилю та максимальна кількість годин у році з переважаючою швидкістю вітру.

Розподіл повторюваності швидкості вітру було розраховано шляхом сумування годин в році з відповідною швидкістю вітру. Результати цих розрахунків показано на рис. 2.4.

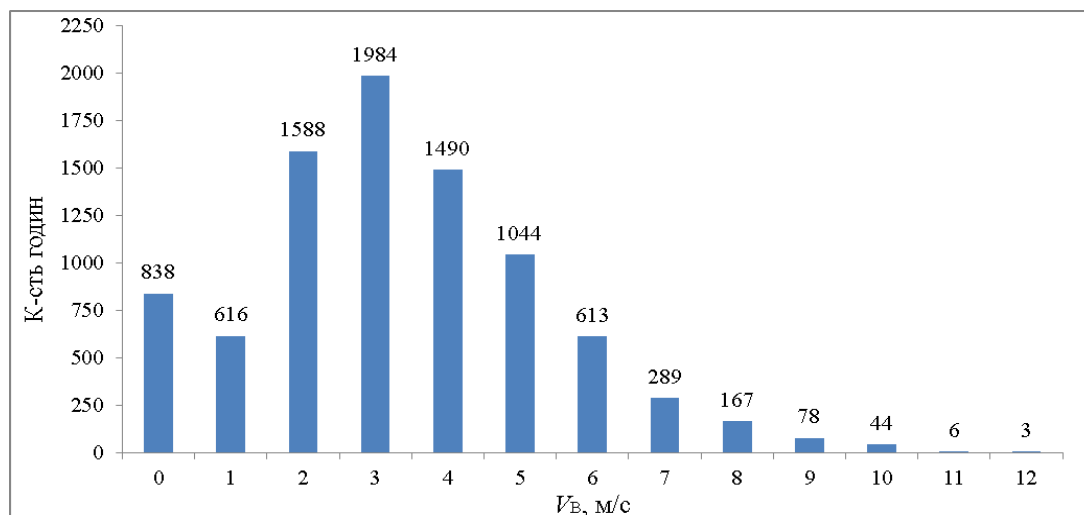


Рис. 2.4. Гістограма розподілу повторюваності швидкості вітру

З рис. 2.4 видно, що м. Львів характеризується слабкими вітрами з переважаючими швидкостями вітру 2 – 5 м/с, і майже десяту частину годин в році займає штиль, тобто відсутність вітру. Вітер зі швидкістю 3 м/с займає найбільшу кількість годин протягом року – 1984 год. Вітер великих швидкостей (10 – 12 м/с), що має високий енергетичний потенціал, буває у Львові вкрай рідко. Тому для генерування ЕЕ з енергії вітру у м. Львові необхідно застосовувати ВЕУ, які зможуть ефективно працювати та генерувати енергію на малих швидкостях вітру. Саме такими є прямопривідні ВЕУ з ВВО, що починають працювати зі швидкості вітру 3 м/с і здатні відбирати потужність від вітру невеликих швидкостей [113]. Для отримання відчутних кількостей ЕЕ на виході з ВЕУ з ВВО останні необхідно виготовляти з ВР великих розмірів, що призведе до погіршення і так невисоких стартових можливостей ВЕУ з ВВО з Н-ротором. Тому кращим варіантом є застосування концентрації вітропотoku на ВР малих розмірів за допомогою відносно великого КВП.

Середньомісячні швидкості вітру було розраховано за наступним виразом (рис. 2.5):

$$\bar{V}_{Bk} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} V_{Bi,k}}{n_k}, \quad (2.1)$$

де \bar{V}_{Bk} – середнє значення швидкості вітру в k -у місяці року;

$V_{Bi,k}$ – середня швидкість вітру протягом i -ї години k -го місяця;

n_k – кількість годин у k -у місяці.

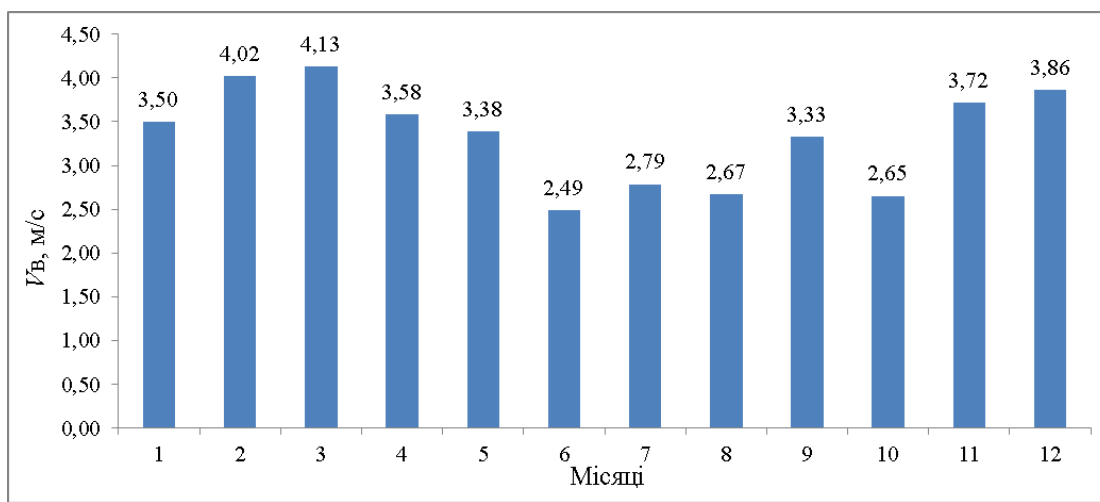


Рис. 2.5. Стовпчаста діаграма розподілу середньомісячної швидкості вітру у м. Львові

Результати розрахунку розподілу середньомісячної швидкості вітру вказують на те, що застосування саме ВЕУ з ВВО є оптимальним варіантом для отримання ЕЕ від енергії вітру у м. Львові, оскільки середньомісячні швидкості вітру є низькими. Найменша середня швидкість вітру припадає на червень – 2,49 м/с, а найбільша – на березень, що рівна 4,13 м/с.

Кількості повторювань напрямків вітру N було розраховано за наступним виразом:

$$N = \frac{N_{\Pi}}{N_3} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

де N_{Π} – кількість повторювань відповідного напрямку вітру протягом року;

N_3 – загальна кількість змін напрямків вітру протягом року.

Кількість повторювань різних напрямків вітру у відсотковому співвідношенні зображено на рис. 2.6.

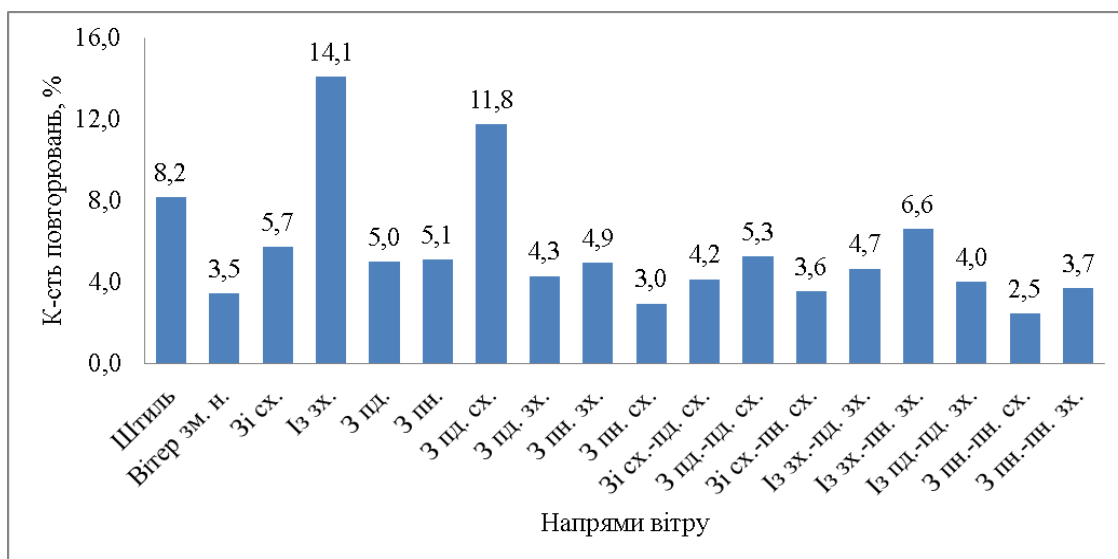


Рис. 2.6. Стовпчаста діаграма повторювань напрямків вітру у м. Львові протягом року

З рис. 2.6 видно, що протягом року напрямки вітру у Львові мають переважно симетричний характер, за винятком деякої переваги західного і південно-східного вітрів. Це ще раз підтверджує переваги застосування ВЕУ з ВВО, яка не потребує переорієнтації на напрям вітру. У випадку застосування концентрації вітропотoku у ВЕУ з ВВО необхідно віддати перевагу симетричному стаціонарному КВП, що виключає потребу його орієнтування на набігаючий вітропотік.

Таким чином, на основі проведеного аналізу вітроенергетичного потенціалу м. Львова та основі аналізу літературних джерел було прийнято рішення про доцільність застосування в регіоні прямопривідних швидкохідних ВЕУ з ВВО, обладнаних стаціонарними симетричними КВП. Останні дають змогу підвищити коефіцієнт відбору потужності від вітру [32], що забезпечить ефективність роботи ВЕУ на малих вітрах, та одночасно дають можливість збільшити стартовий момент ВР.

2.3. Дослідження енергетичних показників регіонального сонячного ресурсу

На підставі інформації з ЕБМД про відносні тривалості хмарності та ясності в інтервалах реального часу було розраховано наступні енергетичні показники сонячного ресурсу:

- погодинні кількості поступлення енергії прямої, розсіяної та повної СР на одиницю площі ФЕП, розміщеної горизонтально, упродовж року в умовах ясного та хмарного неба;
- сумарні річні тривалості ясності та хмарності;
- розподіл повторюваності значень енергії сумарної СР, що надходить на горизонтальну ФЕП;
- розподіл середньомісячного денного значення енергії сумарної СР, що надходить на горизонтальну ФЕП.

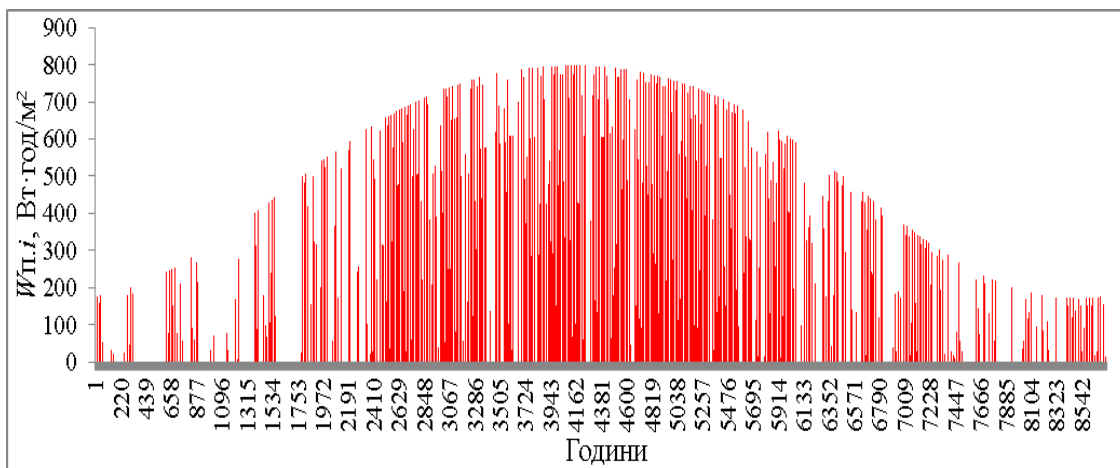
Погодинні кількості поступлення енергії прямої, розсіяної та сумарної СР на ФЕП було розраховано на основі значень середніх питомих потужностей притоків прямої, розсіяної та сумарної СР на горизонтальну площину, та на основі відносних тривалостей хмарності та ясності в інтервалах реального часу.

Значення середніх питомих потужностей притоків складових СР $S_{п.i}$ та $S_{р.i}$ на горизонтальну площину для i -ї години обчислювалися за виразами (1.22)-(1.29), задавши в (1.24) значення кута встановлення ФЕП $\alpha = 0$. Маючи ЕБМД з погодинною інформацією про відносні тривалості ясності $T_{я.i}^*$ та хмарності $T_{х.i}^*$ (рис. 2.3) в інтервалах реального часу для м. Львова за 2013 р., за розрахованими на i -у годину значеннями $S_{п.i}$ та $S_{р.i}$ обчислювалися погодинні кількості поступлення на 1 м^2 енергії сумарної (прямої та розсіяної) СР $W_{с.i}$ (Вт·год/м²) (рис. 2.7):

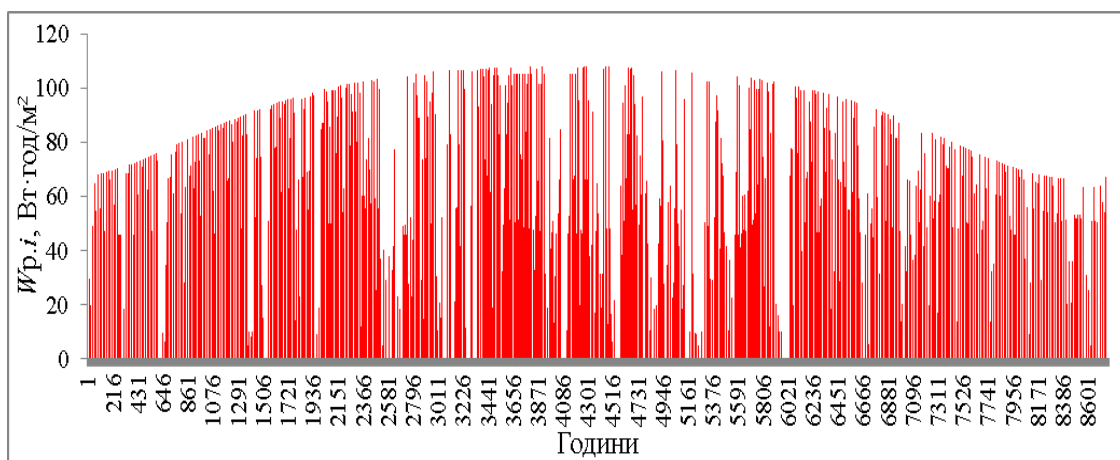
$$W_{с.i} = W_{п.i} + W_{р.i}, \quad (2.3)$$

де $W_{п.i} = S_{п.i} T_{я.i}^*$ – енергія падаючої прямої СР протягом i -ї години;

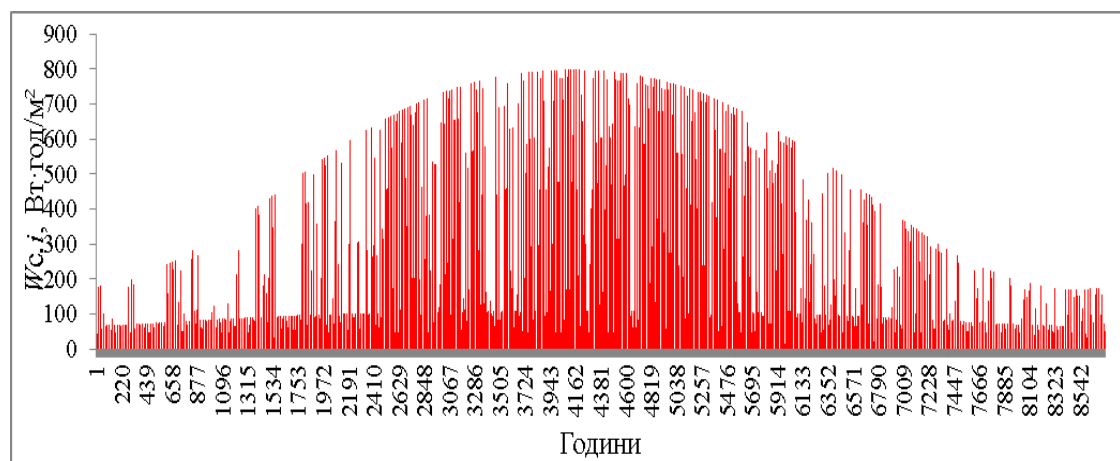
$W_{р.i} = S_{р.i} T_{х.i}^*$ – енергія падаючої розсіяної СР протягом i -ї години.



а)



б)



в)

Рис. 2.7. Часові діаграми погодинних значень притоків енергії прямої $W_{п,i}$ (а), розсіяної $W_{р,i}$ (б) та повної $W_{с,i}$ (в) СР на 1 м^2 горизонтальної площини для м. Львова за 2013 р.

Підрахувавши сумарні кількості відносної тривалості ясності та хмарності впродовж одного року, видно, що небо було більш ясным, ніж захмареним: тривалість ясності – 1753,2 год, тривалість хмарності – 1362,6 год. Решта годин в році сонце не світило через нічний період доби.

На основі розрахованих погодинних значень $W_{C,i}$, $W_{П,i}$, $W_{р,i}$ шляхом сумування годин з відповідними значеннями енергій сумарної СР було розраховано режим повторюваності значень енергії сумарної СР, що надходить на горизонтальну площину (рис. 2.8) (наприклад, для значення годинної енергії сумарної СР $500 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ проводився розрахунок кількості годин із значеннями енергії сумарної СР, що були в діапазоні від 400 до $500 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$).

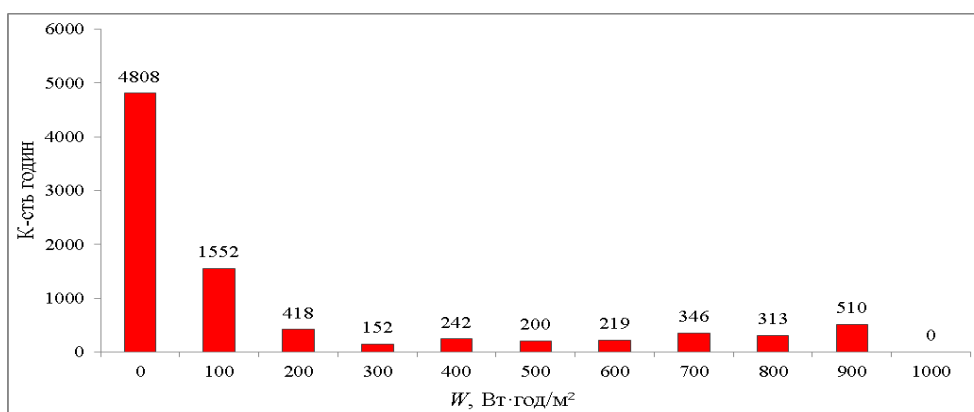


Рис. 2.8. Гістограма повторюваності годинних значень енергії сумарної СР протягом одного року

З рис. 2.8 видно, що понад половину (55,5%) річного часу припадає на відсутність енергії СР, і це пов'язано, перш з все, з нічним періодом доби, а також з високим рівнем хмарності. Значна частина (17,9%) годин у році припадає практично лише на енергію розсіяної СР на рівні $100 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$. Переважно пряма СР з питомою енергією від 400 до $900 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ має місце протягом 1830 год року, що складає 21,1%. Саме на ці години має бути зорієнтована робота ФЕП.

Розподіл середньомісячного добового значення енергії сумарної СР, що надходить на горизонтальну площину, було розраховано за таким співвідношенням (рис. 2.9):

$$\overline{W}_{C.k} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} W_{C.i.k}}{m_k}, \quad (2.4)$$

де $W_{C.i.k}$ – значення енергії сумарної СР, що надходить на 1 м^2 горизонтальної площини, за i -у годину k -го місяця;

m_k – кількість днів у k -у місяці.

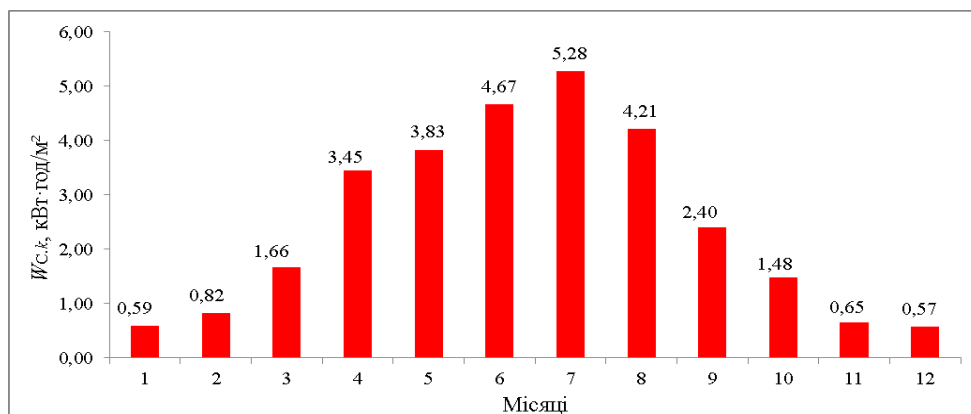


Рис. 2.9. Стовпчаста діаграма розподілу середньомісячного добового значення енергії сумарної СР, що надходить на 1 м^2 горизонтальної площини

З рис. 2.9 видно, що найбільша сонячна активність проявляється в липні, а найменша – в грудні та в січні. Таким чином, у літні місяці року ФЕУ достатньої площі може забезпечувати споживача ЕЕ, в той час як у зимовий період низької сонячної активності доцільно застосувати інше ПДЕ, наприклад, вітер, що дасть можливість суттєво вирівняти графік генерування ЕЕ від ПДЕ.

2.4. Методика розрахунку питомих кількостей ЕЕ, отримуваної від конкретних ВЕУ з ВВО та ФЕП

З метою параметричної оптимізації ВССЕ різної структури з відповідно різними алгоритмами роботи систем керування, необхідно розробити методику розрахунку питомих (в розрахунку на 1 м^2 площі омивання ВЕУ та 1 м^2 площі конкретної ФЕП) кількостей ЕЕ, отримуваних від ВССЕ конкретної конструкції

та при заданих умовах її розміщення. Для цього необхідно поєднати між собою в одному програмному продукті сформовану ЕБМД та параметри, характеристики і закони керування конкретних установок для генерування ЕЕ від вітру і сонця – ВЕУ з ВВО та ФЕУ.

Для дослідження питомих кількостей отриманої ЕЕ від вітру та сонця було взято параметри конкретних установок: ВЕУ з ВВО фірми Eurowind та ФЕП фірми Siemens, номінальні параметри яких наведені у Додатку А.

Використовуючи ЕБМД з інформацією про швидкість вітру, а також залежність вихідної потужності ВЕУ від швидкості вітру (1.1) (значення $C_p(\lambda)$ приймалось рівним 0,351 [188]), було розраховано середні питомі (на 1 м^2 площі омивання ВР) потужності $P_{\text{ВЕУ}i.k}$ та відповідні їм питомі годинні кількості ЕЕ $W_{\text{ВЕУ}i.k}$ на виході конкретної ВЕУ протягом року. ККД електричного генератора приймався рівним 0,85. Далі для розрахунку середньомісячних питомих годинних кількостей генерованої ЕЕ від вітру $\bar{W}_{\text{ВЕУ}k}$ протягом одного року було використано наступне рівняння (рис. 2.10):

$$\bar{W}_{\text{ВЕУ}k} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} W_{\text{ВЕУ}i.k}}{m_k}, \quad (2.5)$$

де $W_{\text{ВЕУ}i.k} = P_{\text{ВЕУ}i.k} \cdot t$ – кількість ЕЕ, згенерованої 1 м^2 площі омивання ВР за i -у годину k -го місяця ($t=1$ год).

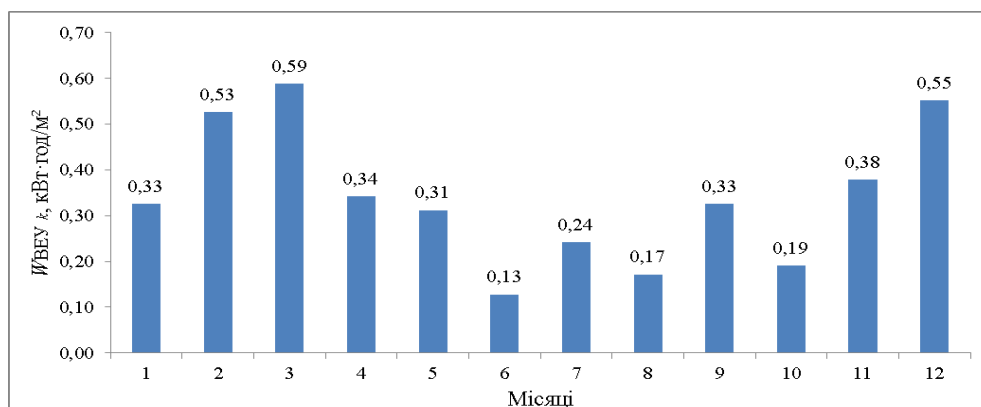


Рис. 2.10. Столпчаста діаграма середньомісячних добових кількостей ЕЕ, генерованої 1 м^2 площі омивання ВР протягом одного року

У цих розрахунках вважалось, що обрана ВЕУ з ВВО працює в ТМВП (рис. 1.2), що забезпечується оптимальним керуванням її навантаження.

Маючи обчислені вище значення середніх годинних питомих потужностей притоку сумарної СР S_i на горизонтальну площину, а також значення відносних тривалостей ясності $T_{я,i}^*$ та хмарності $T_{х,i}^*$, для обраної ФЕП за виразами (1.30)-(1.34) було розраховано погодинні кількості ЕЕ на її виході, а далі аналогічно до виразу (2.4) – середньомісячні добові значення ЕЕ на виході з 1 м^2 площі ФЕП, яка розміщена горизонтально (рис. 2.11).

У дослідженні приймалося, що в системі генерування ЕЕ з енергії сонця передбачено пристрій для контролю роботи ФЕП в ТМВП. За таких умов ФЕП при будь-якій сонячній активності буде генерувати ЕЕ максимально можливої потужності.

Для розрахунку кількості ЕЕ на виході гібридної ВССЕ було створено програмний продукт в середовищі Matlab. З його використанням, задаючи параметри, характеристики і, враховуючи закони керування конкретних ВЕУ з ВВО та ФЕУ, а також застосовуючи статистичну інформацію з ЕБМД, можна оперативно оцінити, яку кількість ЕЕ буде щогодини генерувати ВССЕ при відповідних розміщеннях її складових частин.

Як показали проведені дослідження, територія м. Львова та його околиць характеризується невисоким як сонячним, так і вітровим потенціалами зі стохастичною природою. З метою часткового вирівнювання часового генерування ЕЕ, стає актуальним спільне використання ПДЕ вітру та сонця у гібридній ВССЕ. З рис. 2.12 видно, що в січні, лютому, березні, а також у листопаді та грудні ВЕУ з 1 м^2 площі омивання може згенерувати більшу кількість ЕЕ, ніж ФЕП з тієї ж площі. Зате для решти місяців року картина змінюється на протилежну. Поєднавши ФЕП та ВЕУ в одній установці, можна отримати набагато рівніший характер генерування ЕЕ від ПДЕ (рис. 2.13).

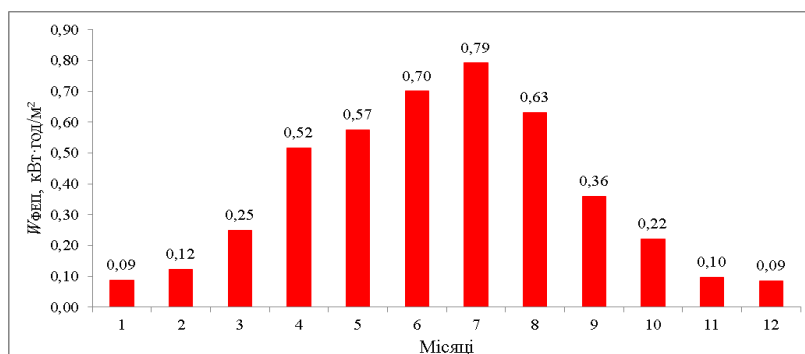


Рис. 2.11. Стовпчаста діаграма середньомісячних добових кількостей ЕЕ, генерованої 1 м² горизонтально розміщеної ФЕП протягом одного року

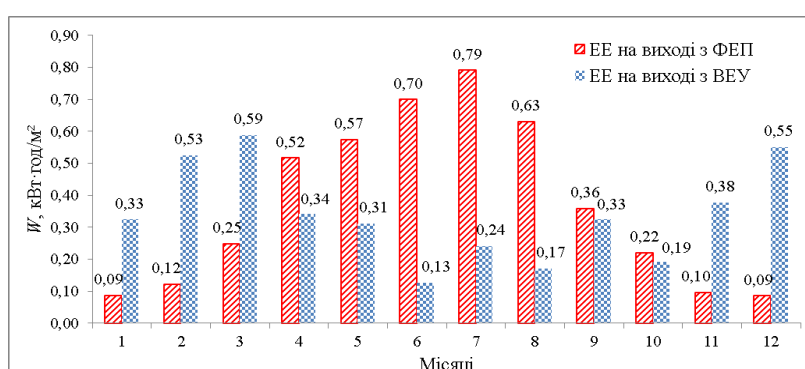


Рис. 2.12. Стовпчаста діаграма середньомісячних добових питомих (з 1 м² площі) кількостей ЕЕ, отриманої від ВЕУ з ВВО та ФЕП протягом року при конкретному їх розташуванні (ФЕП розміщена горизонтально; ВР ВЕУ розташований на висоті – 10 м)

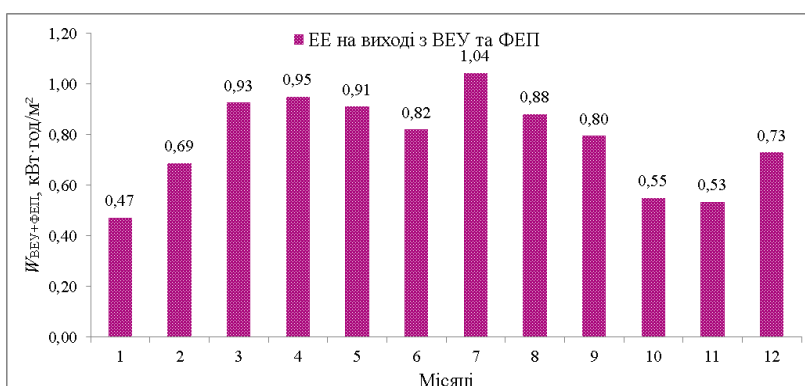


Рис. 2.13. Стовпчаста діаграма сумарних середньомісячних добових питомих кількостей ЕЕ, отриманої від ВЕУ та ФЕП при відповідному (як на рис. 2.12) їх розташуванні протягом одного року

2.5. Обґрунтування ефективної конструкції керованої вітросонячної установки завдяки її новим можливостям

На підставі отриманої вище діаграми розподілу повторюваності швидкості вітру протягом одного року (рис. 2.4) для параметрів досліджуваної ВЕУ з ВВО розраховано значення ЕЕ, яку можна отримати з 1 м^2 площі омивання цієї ВЕУ за відповідної швидкості вітру протягом року (рис. 2.14).

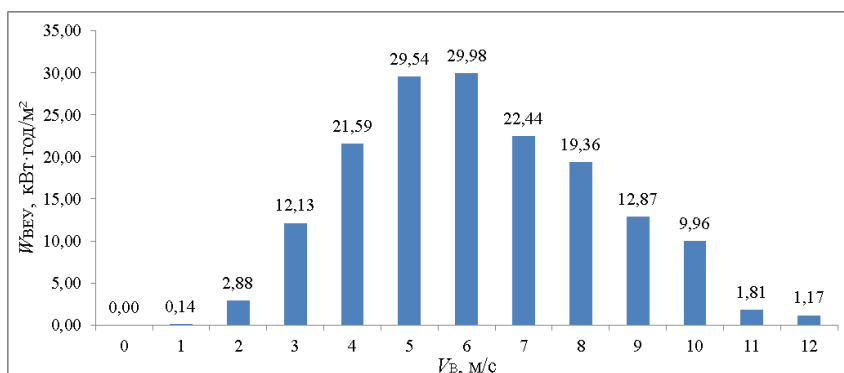


Рис. 2.14. Гістограма розподілу ЕЕ, яку можна отримати з 1 м^2 площі омивання ВЕУ за відповідної швидкості вітру протягом одного року

З рис. 2.14 видно, що протягом року найбільше ЕЕ можна отримати від вітру зі швидкостями 3-10 м/с. Це зумовлено тим, що хоча високі швидкості вітру (6-10 м/с), як видно з рис. 2.4, бувають рідко, проте їх потужність зростає пропорційно до кубу швидкості вітру, що вносить відчутний вклад у річний баланс генерованої ВЕУ ЕЕ. Такий аналіз показує, що для умов м. Львова доцільно створювати ВЕУ, розраховану на невисоку номінальну швидкість вітру – 10 м/с. Для заданої потужності ВЕУ це призведе до значного зростання розмірів ВР, а, значить, збільшення тертя в його опорах, погіршення стартових можливостей та зростання ціни ВЕУ. Усунути ці проблеми можна, застосувавши КВП, який дасть можливість зменшити розміри ВР та покращити його старт і роботу на малих вітрах. На вітрах великих швидкостей доцільно передбачити в конструкції стаціонарного КВП можливість повороту направляючих вітропотоків з метою обмеження його дії на ВР. Це дасть результат, аналогічний до pitch-

регулювання в ВЕУ з ГВО, проте це регулювання набагато простіше реалізувати на стаціонарному КВП, ніж на вітроколесі, що обертається.

Для реалізації ВССЕ, зорієнтованої на низькопотенціальні регіональні ресурси вітру і сонця, пропонується нова конструкція вітросонячної установки, яка складається з ВЕУ з ВВО на базі СГПМ та ФЕУ [171]. Для підвищення енергетичної ефективності ВЕУ з ВВО до її складу входить стаціонарний симетричний КВП, який дає змогу збільшити крутний ВР Н-типу, а також забезпечити самостійний його старт. Дослідження, пов'язані з аеромеханікою ВЕУ з ВВО та з КВП, будуть розглянуті в підрозділі 4.1. Щодо ФЕУ, то для забезпечення кращої енергоефективності, в установці передбачено можливість встановлення ФЕП з оптимальним кутом нахилу до горизонту, а також її азимутальне стеження за сонцем, що реалізується за допомогою поворотного механізму. Порівняльні дослідження низки способів орієнтування панелей відносно сонця проведено у підрозділі 4.2.

Як видно з ескізу (рис. 2.15), вітросонячна установка запропонованої конструкції монтується на нерухомій вертикальній опорі 13, що закріплена на основі 14. На підшипниках 15 встановлено вал 9 з Н-ротором 1. Вал 9 зв'язаний з електрогенератором 8. КВП 2, який має входні 5 та вихідні 6 канали для проходження вітрового потоку, складається з окремих вертикальних направляючих вітропотоку 5а, які закріплені між двома горизонтальними пластинами 3 і 4. Відносно верхньої пластини 3 за допомогою ролика 20, що приводиться в рух кроковим двигуном 7, може обертатися навколо вертикальної опори 13 горизонтальна платформа 17, на якій встановлено ФЕУ 12.

Вітросонячна електроустановка працює наступним чином.

Вітровий потік, який проходить через входні канали 5 КВП 2, діє на аеродинамічні профілі лопатей та обертає ВР 1, який, у свою чергу, приводить через вертикальний вал 9 в рух електрогенератор 8, в якому відбувається перетворення кінетичної енергії в електричну. ФЕП 12 разом з горизонтальною платформою 17 повертаються навколо нерухомого валу 13 за допомогою ролика 20 і привідного крокового електродвигуна 7, якщо ввімкнути електромагнітну

муфту 21. Необхідний кут повороту ФЕП 12 визначається певною кількістю кроків електродвигуна 7, яка задається блоком керування 11. Електромагнітна муфта 21 у знеструмленому стані жорстко фіксує положення горизонтальної платформи 17. Використання в установці фіксатора кутового положення панелі 19 дає змогу встановлювати сонячну панель під оптимальними сезонними чи загальнорічним кутами нахилу панелі до горизонту. Кінцеві вимикачі 22 кутового положення горизонтальної платформи 17 призначені для фіксування початкового та кінцевого її положень, з метою подальшого коректного підрахунку зроблених електродвигуном кроків.

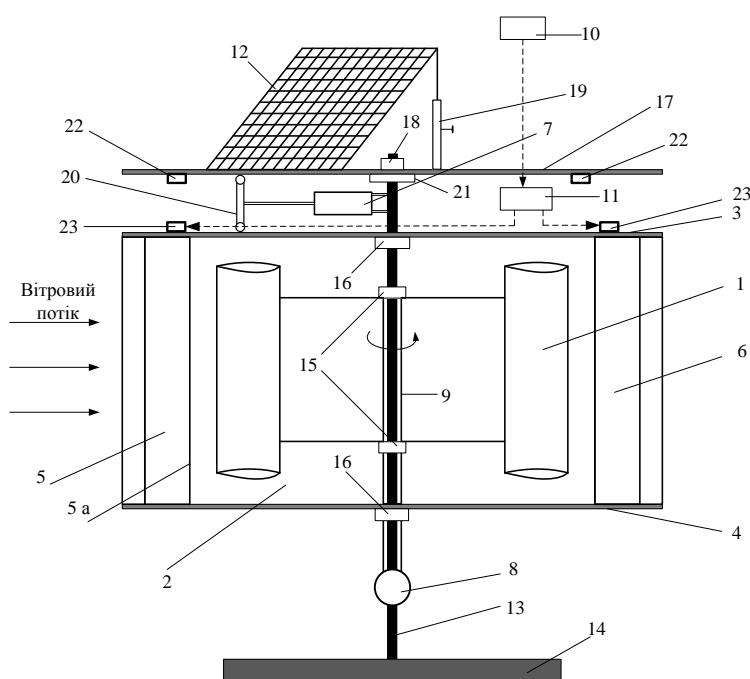


Рис. 2.15. Ескіз конструкції вітросонячної установки

У випадку ураганних вітрів передбачена система захисту установки від руйнувань. Працює система наступним чином.

З давача напрямку вітру 10 інформація надходить до блока керування 11, який подає сигнал до дотягувачів 23, які, в свою чергу, розвертають направляючі концентратора 5а таким чином, щоб звузити вхідні канали КВП. Це призводить до зменшення маси вітрового потоку, що проходить через КВП та діє на лопаті ВР, і в результаті – до зменшення моменту чи зупинки останнього. На рис. 2.16

показано розташування направляючих вітропотоків в нормальному робочому стані (непарні числа) та в стані захисту від надвітрів (парні числа).

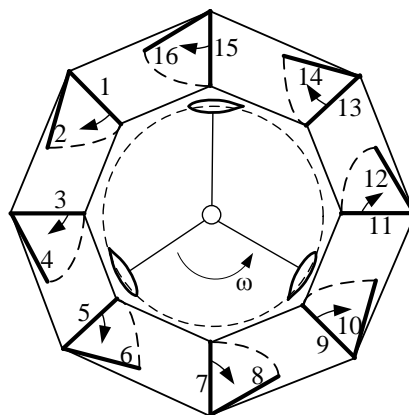


Рис. 2.16. Схематичне зображення системи захисту ВЕУ з ВВО від шквальних вітрів (вигляд зверху)

Можна виділити такі переваги приведеної вище вітросонячної установки:

- поєднання двох ПДЕ для вирівнювання графіку генерування ЕЕ;
- використання симетричного КВП, що дає змогу концентрувати вітер будь-яких напрямів без застосування додаткових пристроїв;
- використання стаціонарного КВП сприяє збільшенню вихідної потужності ВЕУ з порівняно малою обертовою частиною – ВР, що спрощує установку та знижує її ціну;
- несуча конструкція стаціонарного КВП використовується для кріплення вузлів обертання ВР, розташування ФЕП та пристроїв, що забезпечують її слідкування за сонцем;
- елементи КВП беруть участь у механізмі захисту ВР від шквальних вітрів.

Для випадків, коли потужність генерованої ЕЕ буде переважати потужність, необхідну для споживання, надлишкову ЕЕ у автономній системі можна нагромадити в АБ. Останні є однією з найдорожчих частин системи електрозабезпечення, яка ще й має порівняно малий термін служби. Намагання зменшити встановлену ємність АБ приводить до їх швидкого заряджання і втрат генерованої від ПДЕ ЕЕ. В таких випадках надлишкову ЕЕ можна використати, наприклад, на обігрів чи гаряче водопостачання приватного будинку. Це

найчастіше роблять, підключивши до генератора термоелектричні нагрівачі, що встановлюють у бойлері з водою. В такому випадку тепла енергія отримується з механічної енергії ВР через проміжну електричну енергію, що дає генератор. Зрозуміло, що потужність останнього буде обмежувати сумарну генеровану електричну і теплову потужності, які можна отримати від вітру. Іншим вирішенням є доповнення ВЕУ, окрім електричного, ще й окремим тепловим генератором, який перетворюватиме механічну енергію ВР безпосередньо в теплову (рис. 2.17) [170]. Такий тепловий генератор пропонується побудувати за електромагнітним принципом. Звідси і його назва – електромагнітний перетворювач механічної енергії в теплову (ЕПМЕТ).

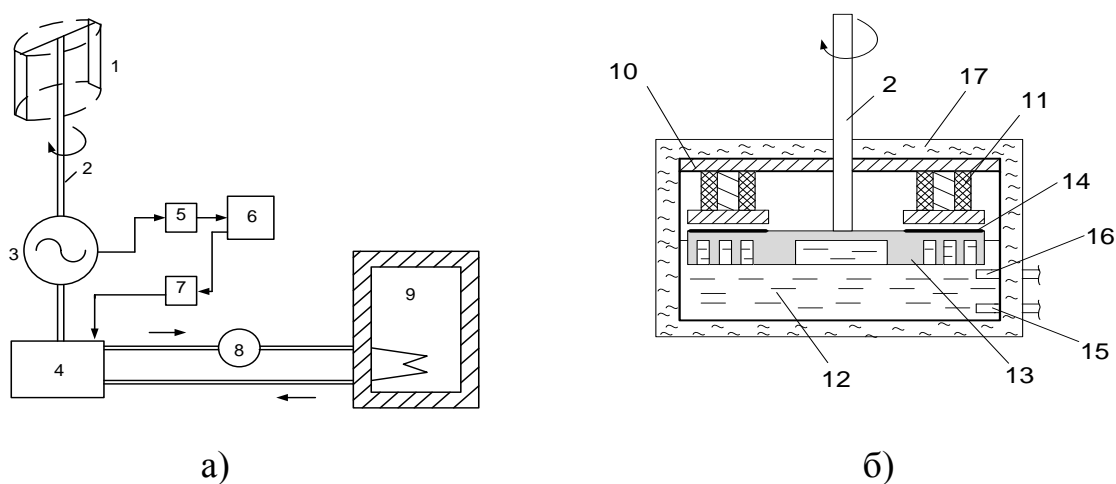


Рис. 2.17. Функціональна схема когенераційної ВЕУ (а)
та ескіз конструкції ЕПМЕТ (б)

Працює така когенераційна ВЕУ наступним чином (рис. 2.17). Вітровий потік обертає ВР 1, який, в свою чергу, приводить в рух вертикальний вал 2, на якому закріплені ротори електрогенератора 3 та ЕПМЕТ 4. Електрична енергія, що генерується в електрогенераторі 3, за допомогою електронного регулятора 5 передається до АБ 6. Через електронний регулятор 7 електромагнітний індуктор 11, що розміщений на статорі 10 ЕПМЕТ 4, отримує живлення постійним струмом від АБ 6. Магнітний потік, який створюється різнополярними полюсами індуктора, замикається через зубці кожних двох сусідніх полюсів, ярмо 10 та феромагнітний ротор 13 з нанесеним на його поверхню немагнітним

струмопровідним шаром 14. При цьому в окремих ділянках тіла ротора 13 та немагнітного струмопровідного шару 14 індукція створеного магнітного поля має різну величину та знак. При обертанні ротора 13 в ділянках його тіла та шару 14 магнітне поле починає змінюватися, що викличе генерування електрорушійних сил, які, в свою чергу, породять вихрові струми. В результаті протікання останніх в роторі 13 та особливо в немагнітному струмопровідному шарі 14, через його високу питому електропровідність, виділятиметься теплота Джоуля. При цьому практично уся механічна енергія, що приводить в рух ротор 13, перетворюється в теплоту, яка нагріває ротор ЕПМЕТ і передається від нього теплоносію, в який цей ротор занурений. За допомогою помпи 8, яка може працювати у двопозиційному режимі, нагрітий теплоносій з резервуару 12 через вихідний патрубок 16 потрапляє в теплоаккумулятор 9 і, віддавши теплоту останньому, вертається через вхідний патрубок 15 назад в резервуар 12. Шляхом регулювання за допомогою електронного регулятора 5 електричного навантаження електрогенератора 3 та регулювання за допомогою електронного регулятора 7 струму збудження в електромагнітному індукторі 11 ЕПМЕТ 4 можна при будь-якій швидкості вітру забезпечувати такий оптимальний момент навантаження на валу 2, при якому ВР працюватиме в ТВМП. При цьому співвідношення між електричною та тепловою потужностями може бути різним, аж до повного відключення одного з каналів генерування енергії, в залежності від потреби споживача.

Порівняно з традиційними електричними, така когенераційна ВЕУ з двома генераторами – електричним і тепловим, має ширші можливості:

- 1) генерує, крім ЕЕ, також і теплову енергію, яка є необхідною в побуті;
- 2) завдяки практично необмеженій ємності теплового акумулятора уся доступна ВЕУ механічна енергія вітру корисно використовується;
- 3) максимально використовується також енергія вітру при його швидкостях, що значно перевищують номінальне значення, яке в традиційних ВЕУ обмежується потужністю електричного генератора, тобто суттєво зростає максимальна потужність ВЕУ при тому ж ВР;

4) можна значно зменшити (аж до повного виключення) встановлену ємність електрохімічних АБ, що знизить вартість ВЕУ.

Таким чином, застосування такої когенераційної ВЕУ дає змогу максимально використати вітровий потенціал для отримання як електричної, так і теплової енергії.

2.6. Висновки до розділу

1. Сформовано інформаційну ЕБМД в середовищі Microsoft Excel, в яку входять інформація про швидкість і напрямки вітру, тривалість сонячного сьйва в інтервалах реального часу, температуру навколишнього середовища у м. Львові протягом 2013 р.

2. Розроблено методику розрахунку погодинної енергії падаючої прямої, розсіяної та повної СР з використанням значень тривалості сонячного сьйва в інтервалах істинного часу. З використанням цієї методики проведено відповідні розрахунки, результати яких доповнили інформаційну базу погодинними значеннями питомої енергії сонячного ресурсу.

3. На основі ЕБМД створено в середовищі Matlab програмний продукт для розрахунку питомої (на одиницю площі омивання ВЕУ та одиницю площі ФЕП) кількості погодинної та сумарної за рік ЕЕ на виході з вітросонячної установки з конкретними параметрами і способом керування при довільному її розміщенні.

4. Проаналізовано річний вітровий та сонячний потенціали для м. Львова та встановлено, що вони не є високими. У зв'язку з цим застосовано комбіноване отримання ЕЕ від вітру і сонця за допомогою вітросонячної установки нової запропонованої конструкції, яка має підвищені енергетичні показники в умовах низькопотенціального поновлюваного ресурсу. Зокрема, енергетична ефективність роботи ВЕУ покращується завдяки застосуванню стаціонарного симетричного КВП, який в конструкції вітросонячної установки має ще низку додаткових функцій, а ефективність ФЕУ зростає завдяки застосуванню системи азимутального стеження ФЕП за сонцем.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ТА ПАРАМЕТРИЧНА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРОВАНИХ ВІТРОСОНЯЧНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

У розділі розглядаються три різні структури ВССЕ, для яких розроблено відповідні системи керування енергопотоками на вищому рівні. Для кожної із структур ВССЕ розроблена методика та відповідне програмне забезпечення для проведення техніко-економічної оптимізації на основі розрахунку обґрунтованих головних критеріїв енергоефективності. Для оперативної техніко-економічної оптимізації параметрів складових елементів ВССЕ застосовано оптимізаційні процедури на основі ГА.

Результати досліджень даного розділу опубліковано в роботах автора [163, 165, 187,190].

3.1. Розроблення методики техніко-економічної оптимізації параметрів складових елементів керованих ВССЕ

Для пошуку оптимальних з точки зору енергоефективності параметрів елементів ВССЕ була використана методика, блок-схема алгоритму якої представлена на рис. 3.1. Вихідною інформацією для розрахунків є: тип досліджуваної структури ВССЕ (блок 1); техніко-економічна інформація про вітросонячну установку (блок 3), яка розраховується та вибирається із сформованої бази даних виходячи з поточних значень варіативних змінних оптимізації (блок 2); заданий середній добовий ГЕН споживача (блок 4), який має ще й різний сезонний характер; погодинні значення метеорологічних даних (блок 5), розміщені в ЕБМД. Перелік варіативних змінних залежить від структури ВССЕ. Так, для автономної ВССЕ – це встановлені потужності ВЕУ з ВВО – $P_{ВЕУ}$ та ФЕУ – $P_{ФЕУ}$, ємність АБ – C_B , кут встановлення ФЕП – α , висота встановлення

ВЕУ – h ; для мережевої – $P_{\text{ВЕУ}}, P_{\text{ФЕУ}}, \alpha, h$; для автономно-мережевої додаються ще коефіцієнти ступеня заряду АБ від ЦМЖ вночі та вдень, відповідно $L_{\text{Н}}$ та $L_{\text{Д}}$.



Рис. 3.1. Блок-схема алгоритму методики техніко-економічної оптимізації параметрів складових елементів керованих ВССЕ

У блоці 6 застосовується розроблений для конкретної структури ВССЕ алгоритм керування погодинними енергоперетоками між вузлами системи. Алгоритми для кожної із структур розроблені таким чином, щоб споживач постійно отримував необхідну кількість ЕЕ з пріоритетом живлення

безпосередньо від ПДЕ, а у випадку використання ЦМЖ як резервного джерела живлення заряджання АБ від ЦМЖ відбувалось вночі за пільговим тарифом на ЕЕ. Завдяки блоку 8 здійснюється імітаційне моделювання річної погодинної роботи досліджуваної ВССЕ із поточним набором значень варіативних змінних, у результаті чого у блоці 7 обчислюються необхідні складові для визначення значення цільової функції. У блоці 9 визначаються економічні показники роботи ВССЕ протягом терміну її служби (20 років) шляхом розрахунку вартості елементів системи, середньорічної ціни ЕЕ на її виході, а далі розраховується значення цільової функції оптимізації. Блок 10, відповідно до процедури ГА, здійснює генну мутацію, в результаті чого формується новий склад варіативних змінних параметрів ВССЕ, який поступає до блоку 4. Після дослідження достатньої кількості комбінацій блоком 11 фіксується досягнутий мінімум цільової функції та подається на вихідний блок 12 оптимальний склад варіативних параметрів досліджуваної ВССЕ.

3.1.1. Системне моделювання роботи ВССЕ. Це моделювання є важливим початковим кроком вищевказаної методики, оскільки воно має безпосередній вплив на результати оптимального підбору параметрів складових елементів ВССЕ та, відповідно, на її окупність. Моделювання роботи ВЕУ з ВВО та ФЕУ проводиться на основі їхніх технічних характеристик, параметрів та законів керування. В дослідженні вважається, що обидва канали генерування ЕЕ працюють в ТВМП. Методика розрахунку погодинних кількостей ЕЕ на виході ВЕУ з ВВО та ФЕУ наведені в попередньому розділі. Далі погодинні кількості генерованої ЕЕ порівнюються з відповідними погодинними кількостями бажаної ЕЕ споживача, і за конкретним алгоритмом в сформованій програмі розраховується баланс перетоків ЕЕ у ВССЕ.

Для максимізації річного обсягу генерування ЕЕ від ФЕУ у складі відповідної ВССЕ, яка розташовується у м. Львові, було використано отримані у підрозділі 4.2.3 значення оптимальних параметрів встановлення ФЕП при різних

способах орієнтації за сонцем – оптимальний кут нахилу панелі до горизонту та застосування системи стеження за сонцем.

Ще одним важливим елементом ВССЕ є електрохімічні АБ. Для розрахунку кількості АБ, які необхідно з'єднати послідовно для отримання того ж рівня напруги, що і у внутрішній мережі системи електропостачання, можна скористатися наступним виразом:

$$N_B = \frac{U_{\text{МЕР}}}{U_B}, \quad (3.1)$$

де $U_{\text{МЕР}}$ – напруга в системі електропостачання;

U_B – напруга на виході однієї АБ.

У ВССЕ, до складу яких входять АБ, розглядаються варіанти їх роботи в режимах заряджання чи розряджання у залежності від годинних обсягів генерування ЕЕ від ПДЕ та потреби споживача.

Для випадку заряджання АБ вираз для розрахунку величини енергії в АБ у час t год має вигляд [88]:

$$E_B(t) = E_B(t-1) + [E_{\Gamma}(t) - E_H(t)]\eta_C, \quad (3.2)$$

де $E_{\Gamma}(t)$ – годинне значення генерованої ЕЕ ВЕУ з ВВО та ФЕУ у час t год;

$E_H(t)$ – годинна кількість ЕЕ навантаження, яка необхідна споживачу в час t ;

η_C – зарядна ефективність АБ.

Кількість енергії АБ в час t , коли АБ розряджається, віддаючи ЕЕ споживачеві, можна розрахувати за таким співвідношенням:

$$E_B(t) = E_B(t-1) - [E_H(t) - E_{\Gamma}(t)]. \quad (3.3)$$

Мінімальну кількість енергії АБ можна виразити через максимальну глибину розряду батареї DOD (Depth Of Discharge) і розрахувати за виразом

$$E_{B_{\text{min}}} = (1 - \text{DOD}) E_{B_{\text{ном}}}, \quad (3.4)$$

де $E_{B_{\text{ном}}}$ – номінальна енергетична ємність АБ.

Якщо обсяг годинної генерованої від ПДЕ ЕЕ перевищує обсяг ЕЕ, необхідної споживачу в конкретну годину, то надлишкова ЕЕ буде нагромаджуватися в АБ, поки величина енергії АБ не досягне максимального значення $E_{B\max}$. Якщо ж на момент часу t енергія батареї досягає $E_{B\max}$, то така ситуація зумовлює появу надлишкової генерованої ЕЕ $E_{\text{НАД}}$, погодинні значення якої можна розрахувати наступним чином:

$$E_{\text{НАД}}(t) = \begin{cases} E_{\Gamma}(t) - \{E_{\text{H}}(t) + \eta_{\text{C}}^{-1}[E_{B\max} - E_{\text{B}}(t-1)]\}, & \text{якщо } E_{\text{B}}(t-1) < E_{B\max} \\ E_{\Gamma}(t) - E_{\text{H}}(t), & \text{якщо } E_{\text{B}}(t-1) = E_{B\max} \end{cases} \quad (3.5)$$

Надлишкова генерована від ПДЕ ЕЕ, яка не може нагромаджуватися в АБ, або втрачається шляхом зменшення генерування, або може бути корисно використана, наприклад, для обігріву будинку [7].

У випадку, коли генерована годинна ЕЕ буде недостатньою для задоволення потреб споживача, а кількість енергії АБ на момент часу t досягне мінімального значення $E_{B\min}$, матимемо справу з дефіцитом ЕЕ, погодинні значення якого $E_{\text{ДЕФ}}$ можна знайти за виразом

$$E_{\text{ДЕФ}}(t) = \begin{cases} E_{\text{H}}(t) - [E_{\Gamma}(t) + E_{\text{B}}(t-1) - E_{B\min}], & \text{якщо } E_{\text{B}}(t-1) > E_{B\min} \\ E_{\text{H}}(t) - E_{\Gamma}(t), & \text{якщо } E_{\text{B}}(t-1) = E_{B\min} \end{cases} \quad (3.6)$$

3.1.2. Кошторисний аналіз ВССЕ. Важливою є оцінка ціни обладнання, що буде використовуватися в системі. Оскільки обладнання для ВССЕ в більшості випадків є імпортом, і його закупівельна вартість залежить від курсу долара США, то для зручності в розрахунках та уникнення перерахунків курсів валюти у зв'язку з її коливанням, ціна на обладнання, яка була отримана з електронних каталогів мережі Internet, в дослідженні виражається в доларах США.

Відповідно до цін на ВЕУ та ФЕП, що пропонуються в каталогах фірм, які їх випускають, були побудовані залежності їх ціни в розрахунку на 1 Вт встановленої потужності ВЕУ та ФЕП від величини потужностей цих апаратів, які

показані відповідно на рис. 3.2 і 3.3. Для побудови залежності ціни 1 А·год для одного елемента АБ від їх встановленої ємності (рис. 3.4) були взяті ціни на свинцево-кислотні АБ з довгим терміном експлуатації (10 років, тип long life) китайського виробника.

Усі отримані залежності змодельовано, використовуючи програму Excel Solver, кривими нелінійної регресії, рівняння яких показані на цих же рисунках. Це було зроблено у зв'язку з необхідністю подальшого використання середніх значень ціни для аналізу вартості ВССЕ.

Для кошторисного аналізу ВССЕ було використано методику, що викладена в [69]. Згідно методики, вартість будь-якої системи електроживлення, крім ціни на обладнання, залежить від інших чинників, наприклад, таких як інфляція чи ставка дисконтування, які, в свою чергу, залежать від економічної ситуації в країні в даний час. Тому під час розрахунку вартості обладнання ВССЕ ці чинники були враховані, оскільки вони дають змогу оцінити реальну вартість установки (індекс інфляції – 10%, ставка дисконтування – 9,5%, відповідно, за даними з [177] та [169]).

Також в дослідженні було враховано витрати на обслуговування елементів системи протягом усього терміну її експлуатації (20 років), а також витрати на заміну елементів (заміна АБ через 10 років роботи системи). Витрати на обслуговування елементів системи встановлювалися в розмірі 1% від ціни устаткування [81].

Під час кошторисного аналізу кожної із ВССЕ, в першу чергу, необхідно розрахувати загальну річну її вартість – ТАС (Total Annualized Cost) за таким співвідношенням:

$$ТАС = \frac{ТЛСС}{СРWF}, \quad (3.7)$$

де ТЛСС (Total Life Cycle Cost) – загальна вартість системи протягом періоду експлуатації;

СРWF (Cumulative Present Worth Factor) – сукупний фактор реальної вартості.

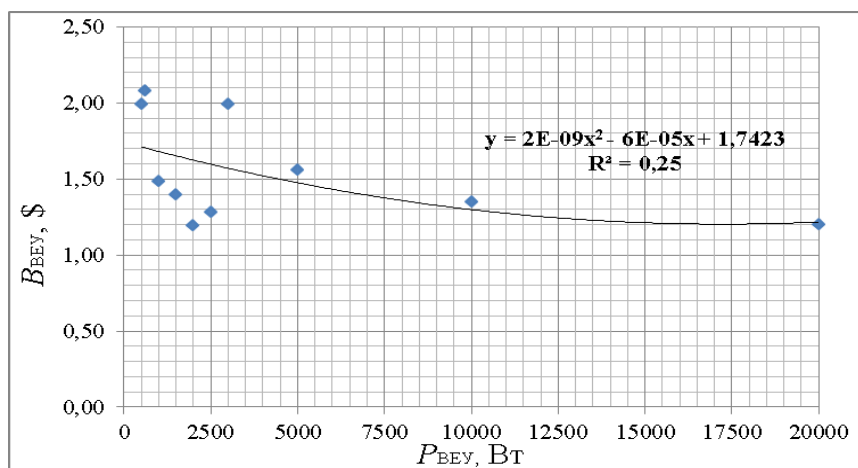


Рис. 3.2. Залежність ціни ВЕУ в розрахунку на 1 Вт встановленої потужності від величини потужності ВЕУ (за даними з [181])

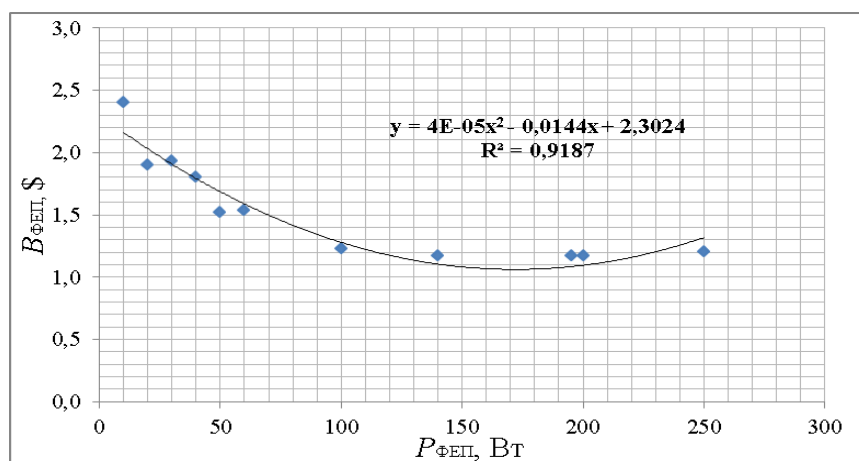


Рис. 3.3. Залежність ціни ФЕП в розрахунку на 1 Вт встановленої потужності від величини потужності ФЕП (за даними з [182])

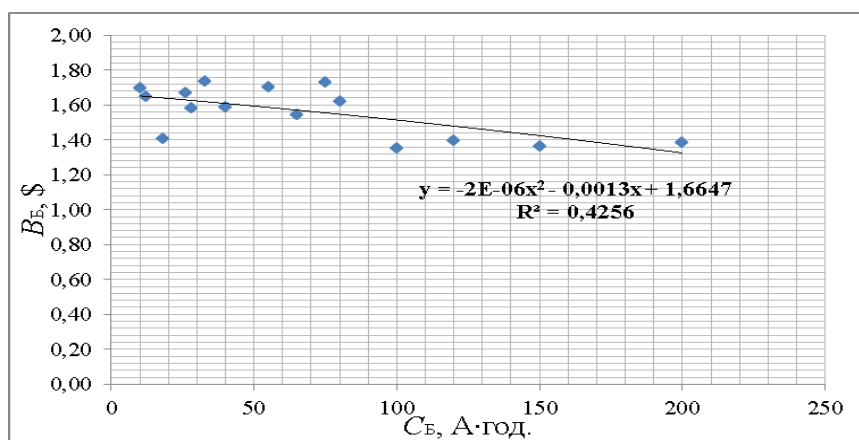


Рис. 3.4. Залежність ціни 1 А·год для одного елемента АБ від ємності АБ (за даними з [180])

CPWF залежить від рівня інфляції та ставки дисконтування, і з використанням цього фактору можна оцінити поточну вартість ВССЕ, виходячи з грошових потоків, які прогнозуються на майбутнє, за умови їх зміни протягом періоду прогнозування. CPWF було розраховано за таким виразом [69]:

$$CPWF = (1 - X^n) / (1 - X), \quad (3.8)$$

де n – термін експлуатації ВССЕ в роках.

Змінна X розраховується за наступним співвідношенням:

$$X = (1 + i) / (1 + d), \quad (3.9)$$

де i – рівень інфляції;

d – ставка дисконтування (коефіцієнт, що застосовується для визначення поточної вартості грошових потоків, які плануються у майбутньому).

TLCC включає в себе вартість кожного елемента системи, вартість обслуговування протягом всього періоду експлуатації, а також вартість заміни АБ. Вартість заміни АБ було розраховано наступним чином:

$$PC_n = X^n PC, \quad (3.10)$$

де PC_n – ціна елемента системи через n років, приведена до реального часу;

PC – ціна елемента системи в поточний час.

Використання вищенаведеної методики розрахунку загальної вартості ВССЕ, приведеної до одного року, дає змогу оцінити систему електроживлення з економічної точки зору. Так, на основі цих результатів розраховується ціна ЕЕ СОЕ (1.40) на виході автономної ВССЕ. Отож, логічно, що показник СОЕ повинен бути цільовою функцією під час техніко-економічної оптимізації ВССЕ, і за його найменшим значенням будуть вибиратися оптимальні параметри елементів автономної ВССЕ. У випадку мережевої ВССЕ, надлишкова генерована ЕЕ якої буде віддаватись в мережу, споживач має за мету не лише влаштувати власне електрозабезпечення, але й отримати прибуток від своєї енергетичної

діяльності. Тому цільовою функцією мережевої ВССЕ має виступати прибуток від продажу виробленої надлишкової ЕЕ в ЦМЖ по «зеленому» тарифу з врахуванням затрат на встановлення і експлуатацію вітросонячної установки – ТІОЕС (Total Income of Energy Sold). В автономно-мережевій ВССЕ задання інше – власне електрозабезпечення від ПДЕ та ЦМЖ мінімальними коштами. Тому цільову функцію можна назвати СОС (Cos Of the System) – сукупна річна вартість установки з врахуванням річних витрат на споживання ЕЕ з ЦМЖ.

3.1.3. Методика параметричної оптимізації ВССЕ за методом ГА.

Відповідно до сформованої погодинної ЕБМД, погодинного ГЕН споживача, алгоритмів керування, характеристик та цін елементів кожної із вищевказаних структур ВССЕ, а також на основі розробленої методики розрахунку кількості генерованої від ПДЕ ЕЕ, були написані пакети прикладних програм, які дають змогу оцінити значення відповідної цільової функції для кожної структури ВССЕ, а також визначити оптимальну конфігурацію елементів системи.

У даному дослідженні ГА використовуються для того, щоб знайти глобальні екстремуми цільових функцій на множині варіативних змінних.

Для реалізації пошуків глобальних екстремумів фітнес-функцій – цільових функцій для кожної із структур ВССЕ, було використано програмне середовище MATLAB, а також один з його оптимізаційних модулів – GA optimization tool. У файлі-програмі, яка закодована необхідним чином, і до якої звертався ГА, на підставі вихідних даних було реалізовано розрахунок погодинних енергетичних потоків між вузлами системи відповідно до заданого алгоритму роботи ВССЕ протягом цілого року, а також, відповідно до обраної ГА конфігурації параметрів елементів системи, відбувався розрахунок фітнес-функцій. Таким чином, файл-програма за своєю структурою складається з трьох складових: 1) алгоритму розрахунку погодинних енергетичних перетоків потужності між вузлами системи протягом цілого року (в тому числі потоків генерування ЕЕ вітросонячною установкою, споживання ЕЕ та її нагромадження чи віддавання до ЦМЖ); 2) алгоритму проведення кошторисного аналізу системи; 3) алгоритму пошуку

оптимальної конфігурації параметрів елементів ВССЕ. Вхідною інформацією для роботи ГА є ЕБМД в середовищі Excel, ГЕН споживача та ціни на обладнання ВССЕ.

На початку роботи ГА відбувається початкова ініціалізація, під час якої формується випадкова популяція з хромосом, що складаються з геномів (рис. 3.5). Відповідно до теорії ГА, в даному випадку в геномах кодуються в двійкових кодах варіативні параметри, а хромосомами виступають набори значень усіх варіативних параметрів елементів ВССЕ. Ці хромосоми є можливими, зате не оптимальними розв'язками поставленої задачі. Потім, поступово для кожної з хромосом створеної популяції відбувається розрахунок цільової функції (фітнес-функції), яка і визначає ефективність даної хромосоми. Далі за допомогою кількох основних операторів – мутації, кросинговера, інверсії та селекції [160] відбувається формування нової популяції. Оператори застосовуються для того, щоб знайти кращі розв'язки в порівнянні з розв'язками попередньої популяції. Генетичні оператори повторюють роботу до виконання умови досягнення фітнес-функцією екстремального значення. На рис. 3.6 показано вікно модуля GA optimization tool програми Matlab.

Процес роботи ГА відбувається таким чином. В комірці Fitness Function задається ім'я файлу, до якого має звернутися ГА. Для кожної зі структур ВССЕ файл-програми, до яких звертається ГА, є різними, але у всіх відбувається розрахунок своєї заданої цільової функції. Результат розрахунку виводиться в полі вікна модуля Run solver and view results. В комірці Bounds задаються нижня і верхня межі діапазону значень параметрів елементів ВССЕ, в якому розраховується фітнес-функція. Число параметрів, для яких відбувається оптимізація, задається в полі Number of variables. Після завершення розрахунків ГА вибирає оптимальну конфігурацію параметрів елементів ВССЕ, якій відповідає мінімальне чи максимальне, в залежності від структури ВССЕ, значення фітнес-функції (для автономної та автономно-мережевої ВССЕ – мінімальне значення фітнес-функції, а для мережевої – максимальне).

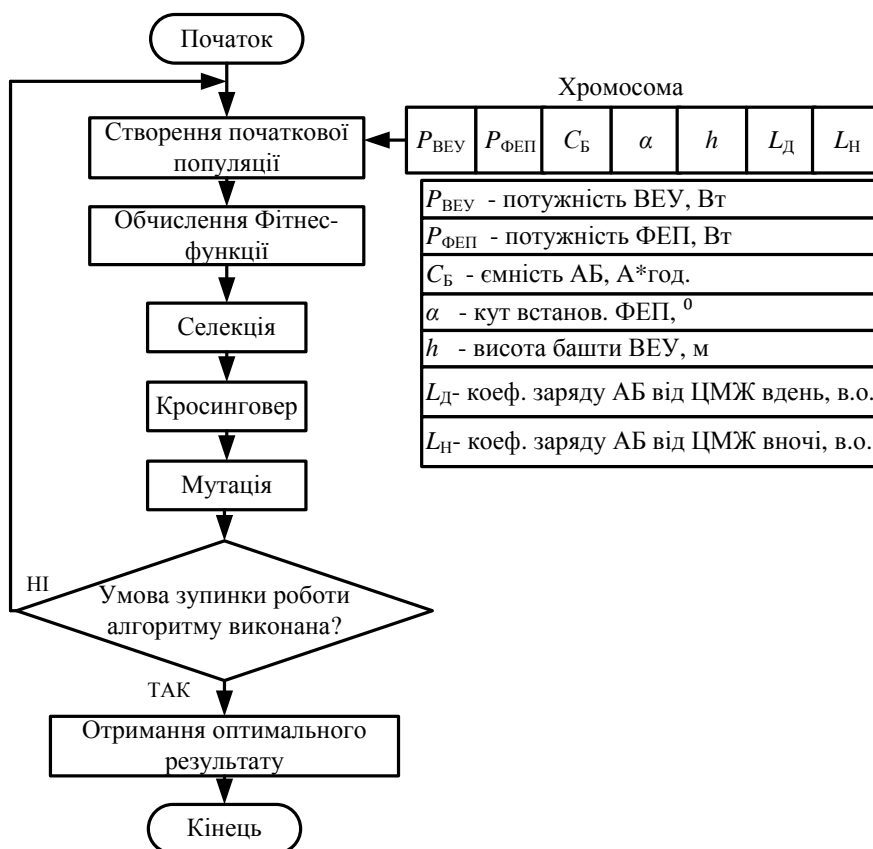


Рис. 3.5. Алгоритм роботи ГА з параметричної оптимізації ВССЕ

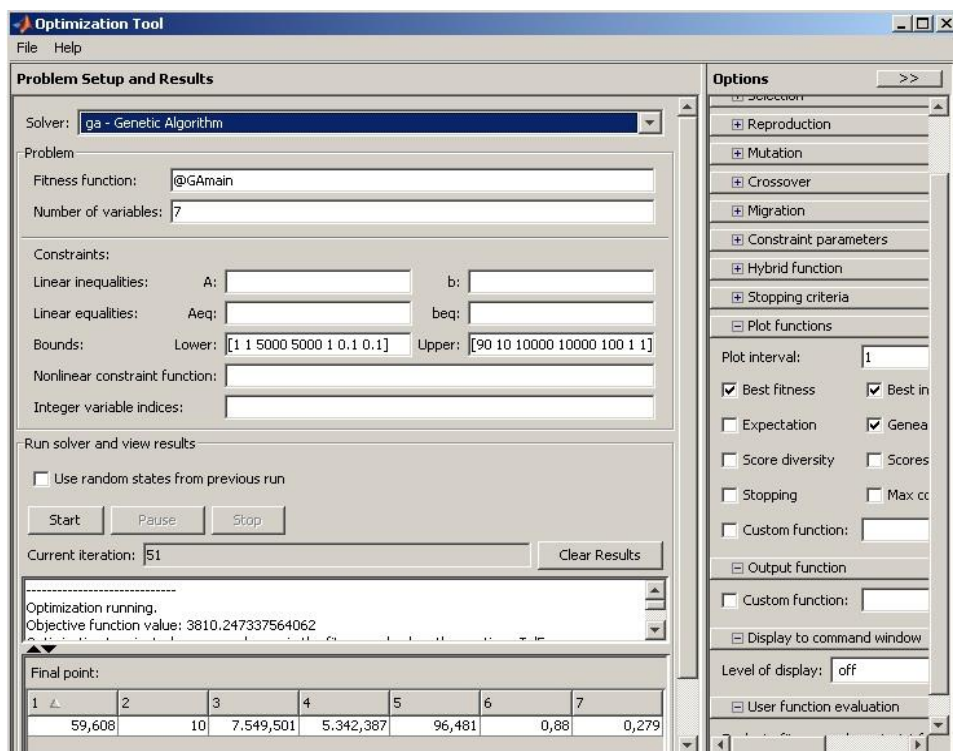


Рис. 3.6. Вікно модуля GA optimization tool програми Matlab

У полі Final Points після розрахунку виводяться значення оптимальних параметрів елементів відповідної ВССЕ. За допомогою поля Plot Functions можна забезпечити візуалізацію параметрів роботи ГА (рис. 3.7-3.8).

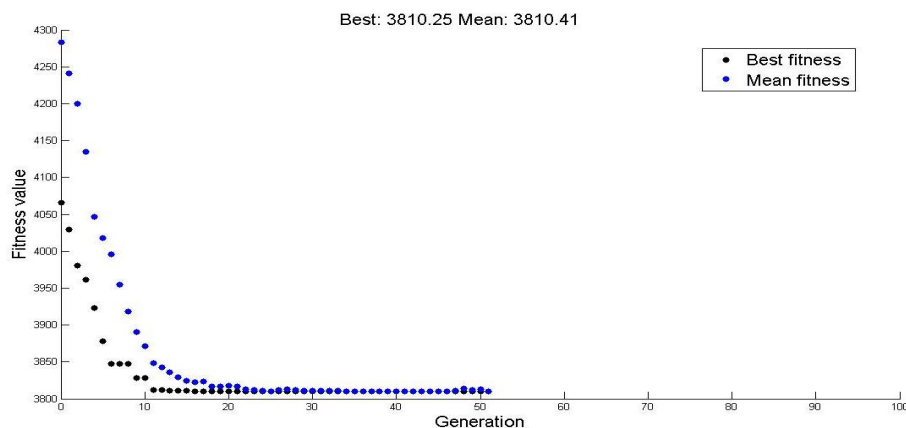


Рис. 3.7. Приклад візуалізації розрахунку найкращого та середнього значення фітнес-функції

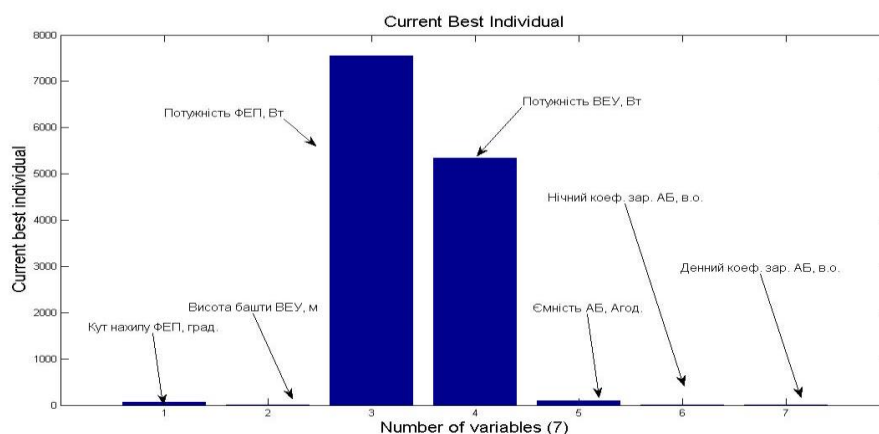


Рис. 3.8. Приклад візуалізації оптимальних значень параметрів

3.2. Автономна ВССЕ та її параметрична оптимізація

3.2.1. Алгоритм роботи автономної ВССЕ. В автономній ВССЕ (рис. 3.9) генерування ЕЕ ВЕУ з ВВО та ФЕУ регулюються своїми локальними системами автоматичного керування через напівпровідникові перетворювачі PC1 та PC2 з метою роботи ВЕУ та ФЕП у ТВМП. Сумарна генерована від ПДЕ ЕЕ передається на шину постійної напруги 220 В – DC bus1. Для накопичення надлишкової ЕЕ та

забезпечення нею споживача в періоди дефіциту її генерування від ПДЕ, в ВССЕ використовується АБ, заряджання чи розряджання якої відбувається за допомогою контролера заряду РС3. У випадках, коли АБ повністю заряджена, а споживання є мінімальним, надлишкову генеровану ЕЕ від ПДЕ можна використати на інші потреби споживача, наприклад, на обігрів.

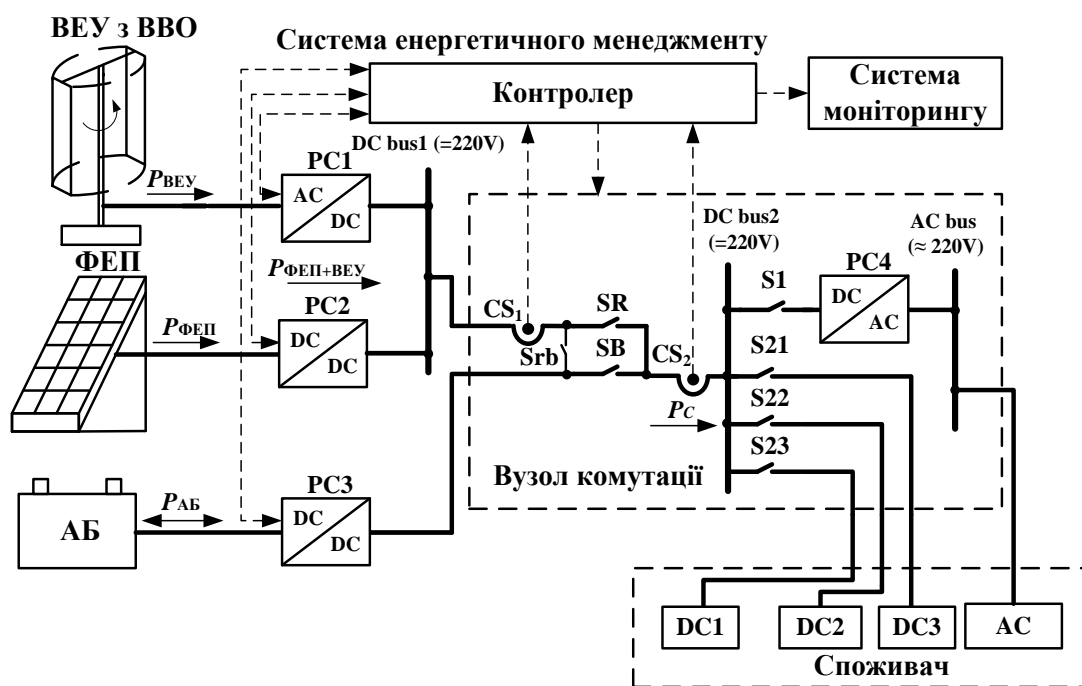


Рис. 3.9. Функціональна схема автономної ВССЕ

Споживачі ЕЕ в запропонованій автономній ВССЕ розділено на споживачів змінного струму АС (пральні машини, пристрої, що заживлені через трансформатори на промисловій частоті) та споживачів постійного струму DC (енергозберігаюче освітлення, відео та аудіо апаратура, комп'ютери, побутова техніка, сигналізація). АС споживачі отримують живлення від шини змінної напруги 220 В АС bus, яка через інвертор РС4 може житися від шини постійної напруги 220 В DC bus2. Споживачі DC розділено, в свою чергу, за величиною споживаної потужності та/чи пріоритетом живлення на, наприклад, три групи DC1, DC2, DC3. Іншим можливим варіантом є використання на об'єкті електроживлення тільки споживачів постійного струму – це виключить необхідність використання в системі відносно дорогого інвертора.

Функцію підмикання груп споживачів до шини DC bus1 чи батареї АБ виконує вузол комутації за допомогою перемикачів SR, SB, S1, S21, S22, S23. Прийняття рішення про необхідну комутацію здійснює система енергетичного менеджменту (СЕМ), реалізована на контролері, до якого надходять сигнали від давачів струмів генерування CS1 та споживання CS2.

Система моніторингу, яка зв'язана з контролером, постійно отримує інформацію про кількість виробленої чи спожитої ЕЕ. У випадку її підключення до мережі Internet, споживач може відслідковувати перебіг процесів електроживлення об'єкта.

Узагальнений алгоритм роботи автономної ВССЕ окремого об'єкта (рис. 3.10) розроблено на основі наступних пріоритетів. По-перше, споживач повинен максимально використовувати генеровану ПДЕ ЕЕ, і, по можливості, безпосередньо нею житися. По друге, живлення об'єкта повинно бути забезпечено із заданим рівнем критерію імовірності втрати живлення DPSP (1.38).

Працює алгоритм наступним чином.

У блоках 1 і 2 СЕМ зчитує з давачів CS1 та CS2 значення струмів, отримуючи інформацію про сумарну генеровану ВЕУ та ФЕП потужність $P_{Г}(t)$ та потрібну споживачу потужність $P_{Н}(t)$. У блоці 3 миттєві значення $P_{Г}(t)$ і $P_{Н}(t)$ порівнюються. Для випадку, коли $P_{Г}(t)$ є більшою за $P_{Н}(t)$, СЕМ дає команду на замикання перемикача SR. При цьому споживач живиться ЕЕ від ПДЕ (блок 4). Далі СЕМ перевіряє чи АБ повністю заряджена (блок 5). Якщо АБ повністю заряджена, то надлишкова кількість ЕЕ за допомогою замкненого перемикача SR використовується споживачем на інші потреби, наприклад, на обігрів (блок 6), а якщо ні, то нагромаджується в АБ за допомогою замкненого перемикача S_{rb} (блок 7). Для випадку, коли $P_{Г}(t)$ є меншою за $P_{Н}(t)$, СЕМ дає команду на замикання перемикачів SB та SR. Далі СЕМ перевіряє, чи АБ розрядилась до свого мінімального рівня $E_{\text{бmin}}$ (блок 8). Якщо АБ не повністю розряджена, то споживач отримує необхідну кількість ЕЕ, використовуючи наявну кількість ЕЕ від ПДЕ та ЕЕ з АБ (блок 9). У випадку повного розряду АБ живлення лише від ПДЕ

отримують лише найбільш критичні групи споживачів, а інші відмикаються (блок 10).

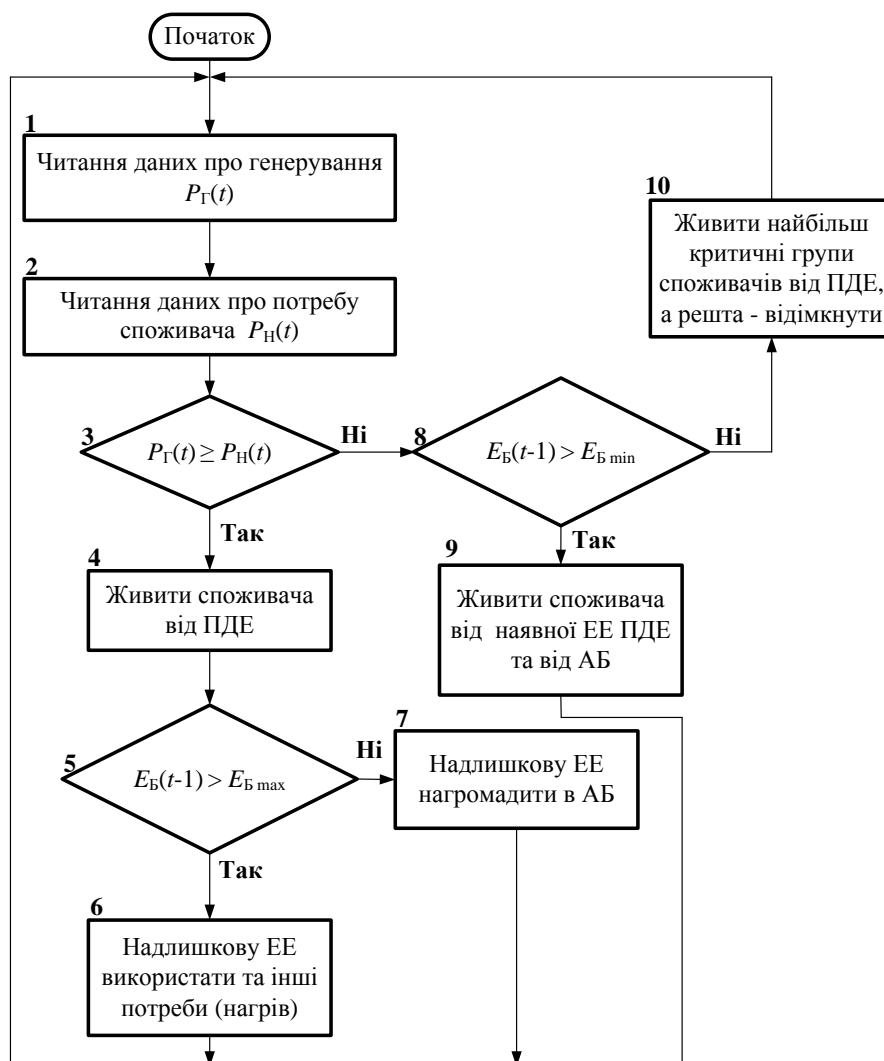


Рис. 3.10. Узагальнений алгоритм роботи автономної ВССЕ

3.2.2. Алгоритм розрахунку критеріїв енергоефективності автономної ВССЕ. Алгоритм розрахунку СОЕ, поточного значення ступеня заряду АБ E_B , а також додаткових показників енергоживлення DPSP та REPG в автономній ВССЕ показано на рис. 3.11. Він працює так.

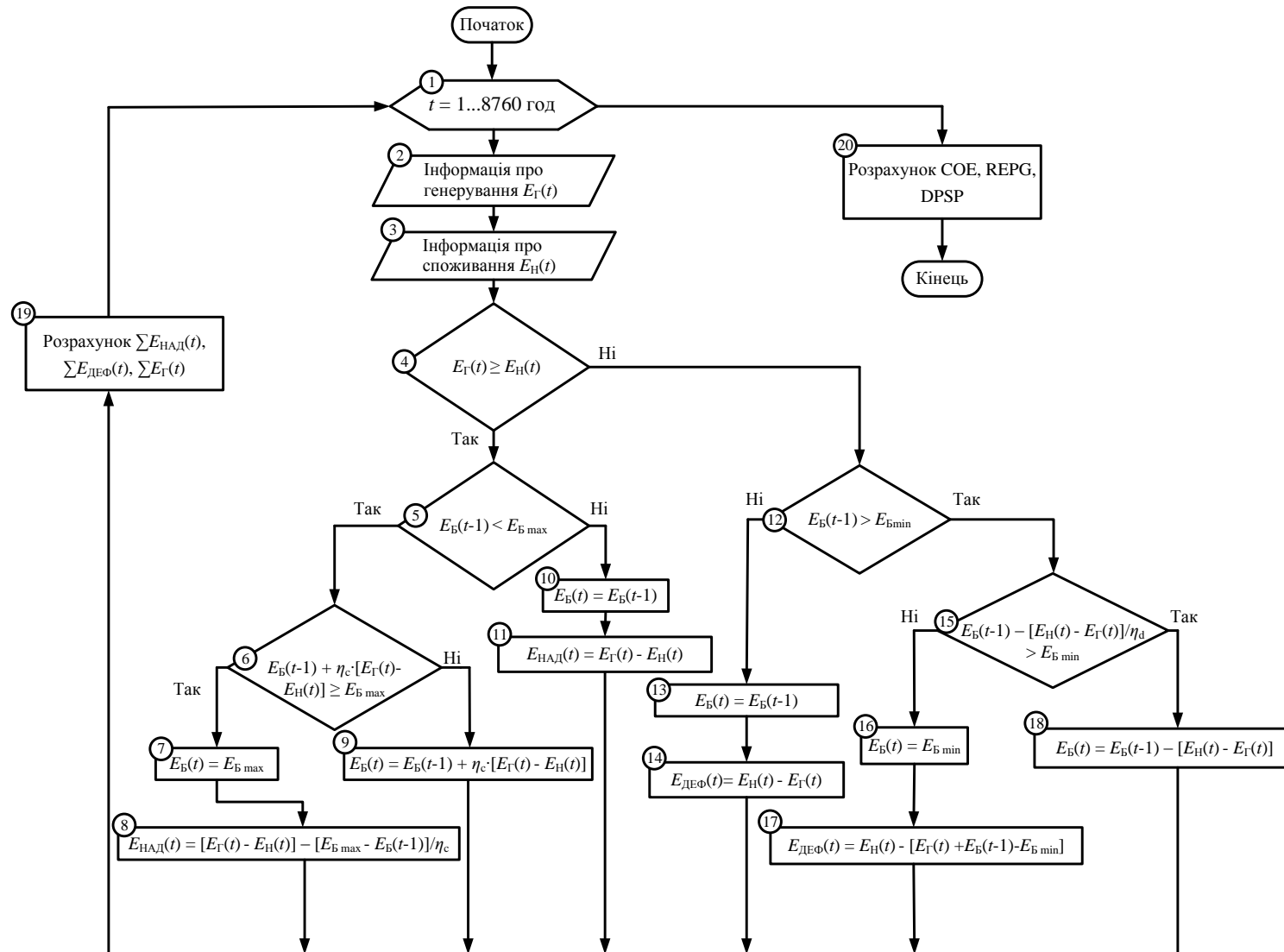


Рис. 3.11. Алгоритм розрахунку значень енергії АБ, показників дефіциту на надлишку ЕЕ DPSP та REPG, а також цільової функції COE в автономній ВССЕ

У блоці 1 організовано цикл на 8760 год для подальших погодинних розрахунків. У блоці 2 читаються дані про значення на конкретну годину року сумарної генерованої ВЕУ та ФЕУ енергії $E_{Г}(t)$, а у блоці 3 – дані про кількість енергії $E_{Н}(t)$, яка необхідна споживачу в конкретну годину доби. У блоці 4 значення $E_{Н}(t)$ і $E_{Г}(t)$ порівнюються. Для випадку, коли $E_{Г}(t)$ є більшою за $E_{Н}(t)$, відбувається порівняння значення заряду АБ $E_{Б}(t-1)$ за попередню годину зі значенням максимального ступеня заряду АБ $E_{Б\max}$ (блок 5). Якщо умова виконується, то в блоці 6 між собою порівнюються поточне значення заряду АБ $E_{Б}(t-1)$ на попередню годину та кількість надлишкової ЕЕ, що повинна нагромадитися в АБ з ПДЕ зі значенням $E_{Б\max}$. У випадку, коли значення $E_{Б}(t-1)$ разом із надлишковою ЕЕ від ПДЕ перевищить значення $E_{Б\max}$, відбудеться розрахунок надлишку ЕЕ $E_{НАД}(t)$ (блок 8). Значення заряду $E_{Б}(t)$ прирівнюється до $E_{Б\max}$ (блок 7). В іншому випадку поточне значення заряду АБ буде розраховане, як показано у блоці 9. Якщо умова у блоці 5 не виконується, то поточне значення заряду АБ $E_{Б}(t)$ прирівнюється до свого значення за попередню годину $E_{Б}(t-1)$ (блок 10), а надлишок генерованої ЕЕ від ПДЕ розраховується так, як показано у блоці 11. Якщо кількість $E_{Г}(t)$ є меншою за $E_{Н}(t)$, відбувається порівняння значення заряду АБ $E_{Б}(t-1)$ за попередню годину зі значенням мінімального ступеня заряду АБ $E_{Б\min}$ (блок 12). У випадку не виконання умови $E_{Б}(t)$ прирівнюється до свого значення за попередню годину $E_{Б}(t-1)$ (блок 13), а дефіцит ЕЕ розраховується так, як показано у блоці 14. Якщо ж умова у блоці 12 виконується, то в блоці 15 між собою порівнюються значення енергетичної ємності АБ $E_{Б}$, що може покрити потребу споживача у ЕЕ зі значенням мінімального ступеня заряду АБ $E_{Б\min}$. Якщо значення $E_{Б}$ є більшим за значення $E_{Б\min}$, то відбувається розрахунок поточного значення заряду АБ (блок 18). У випадку не виконання умови $E_{Б}(t)$ прирівнюється до свого мінімального значення $E_{Б\min}$ (блок 16), а у блоці 17 розраховується дефіцит ЕЕ.

У блоці 19 відбувається поточне сумування енергій $\sum E_{НАД}(t)$, $\sum E_{ДЕФ}(t)$, $\sum E_{Г}(t)$, кінцеві за рік значення яких необхідні для розрахунку значень цільової функції COE і додаткових показників енергопостачання DPSP та REPG (блок 20).

3.2.3. Приклад параметричної оптимізації автономної ВССЕ. Для моделювання навантаження досліджуваної ВССЕ було використано добовий графік споживання ЕЕ невеликим індивідуальним котеджем, розміщеним неподалік м. Львова. Традиційно споживач найбільше потребує ЕЕ в ранню пору доби та ввечері, відповідно у години з 5.00 до 9.00 та з 17.00 до 22.00. Щодо сезонного електроспоживання, то найбільше ЕЕ індивідуальний котедж потребуватиме в зимову пори року, трохи менше весною та восени і найменше влітку. Орієнтовно розрахований добовий ГЕН з посезонною його зміною зображено на рис. 3.12, а часову діаграму річного погодинного споживання ЕЕ цим об'єктом приведено на рис. 3.13.

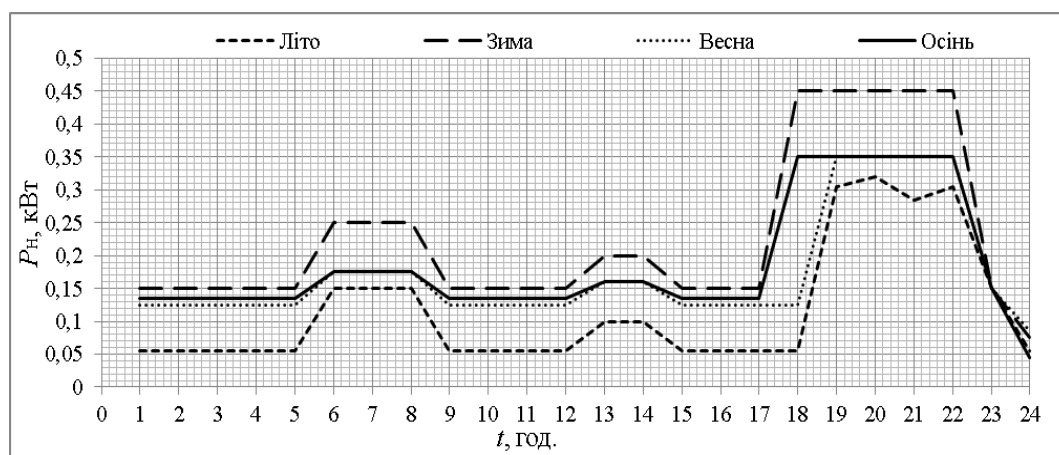


Рис. 3.12. Добовий ГЕН з посезонною зміною, який використано в автономній ВССЕ

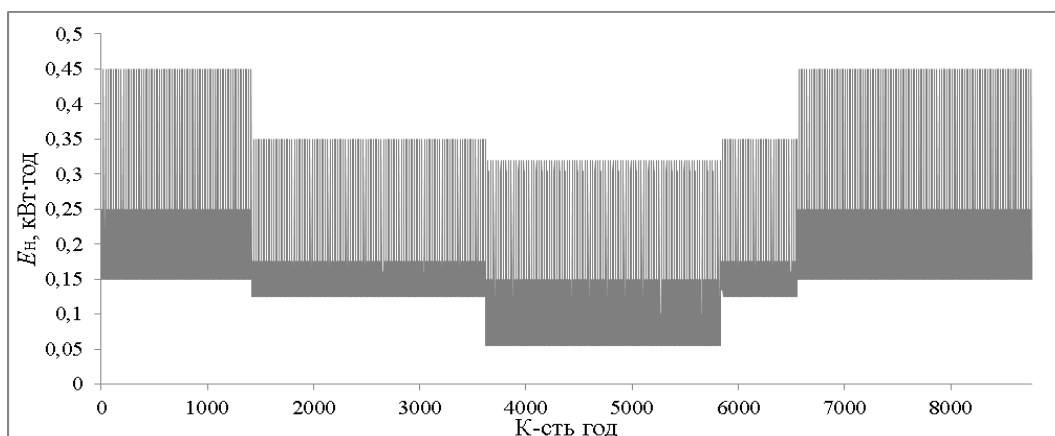


Рис. 3.13. Часова діаграма річного погодинного споживання ЕЕ в автономній ВССЕ

Для прикладу за вищенаведеним алгоритмом розрахунку (рис. 3.11) та, відповідно до ГЕН споживача (рис. 3.13), в середовищі Matlab було розраховано та побудовано на рис. 3.14 і 3.15 у вигляді 3D поверхонь залежності показників DPSP та REPG від встановлених потужностей ВЕУ та ФЕУ. Ємність АБ було взято зі значенням 10 А·год (кількість АБ – 19, $U_B=12$ В).

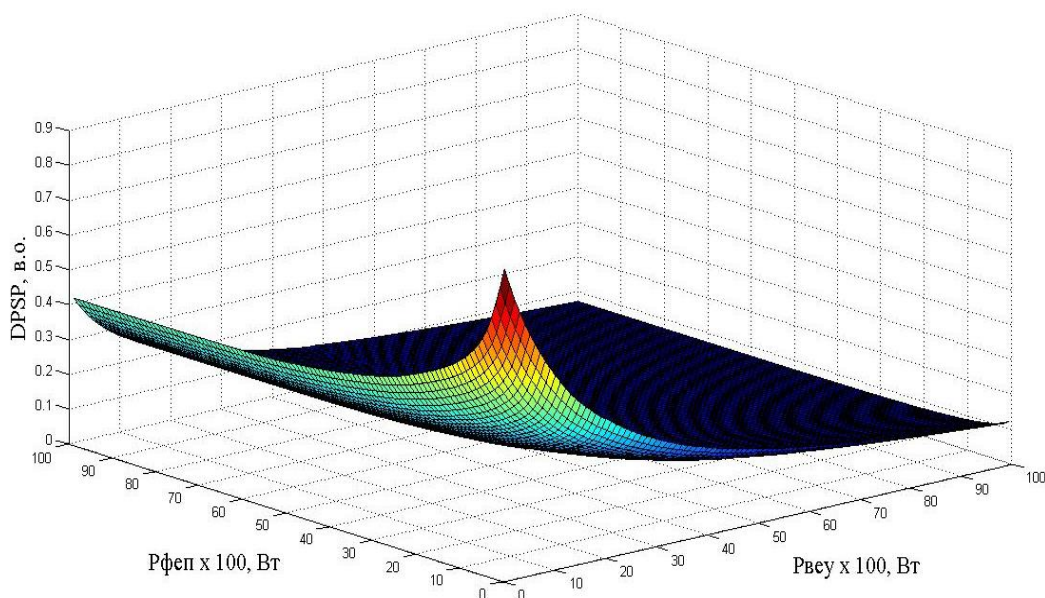


Рис. 3.14. Залежність DPSP в автономній ВССЕ від встановлених потужностей ВЕУ та ФЕУ з використанням АБ ємністю 10 А·год

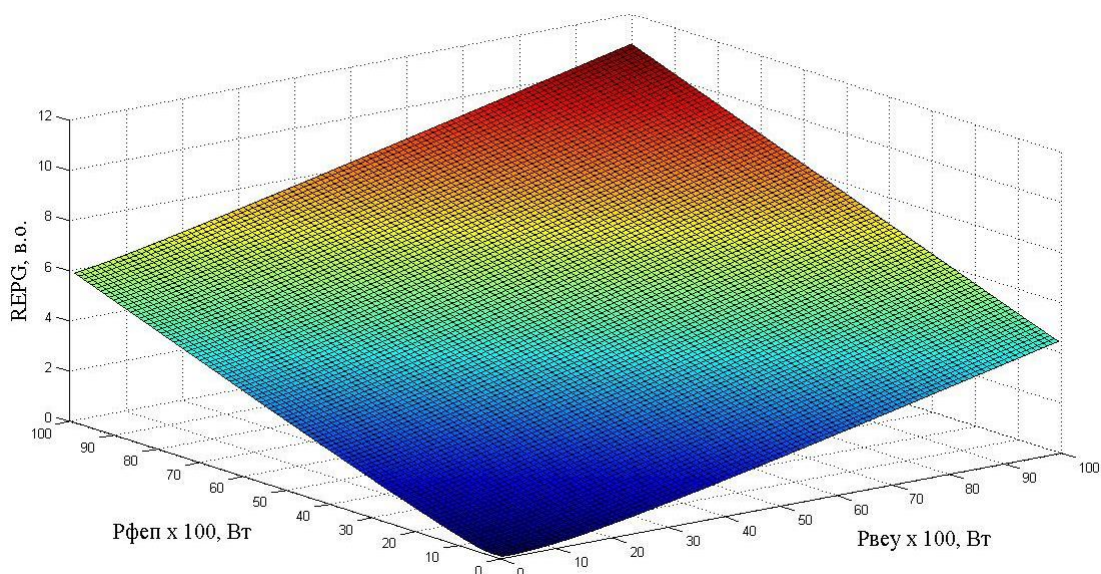
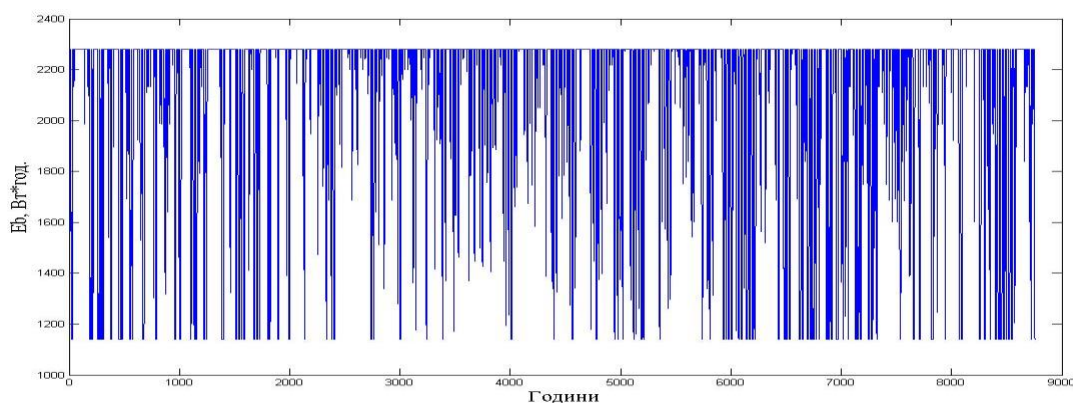


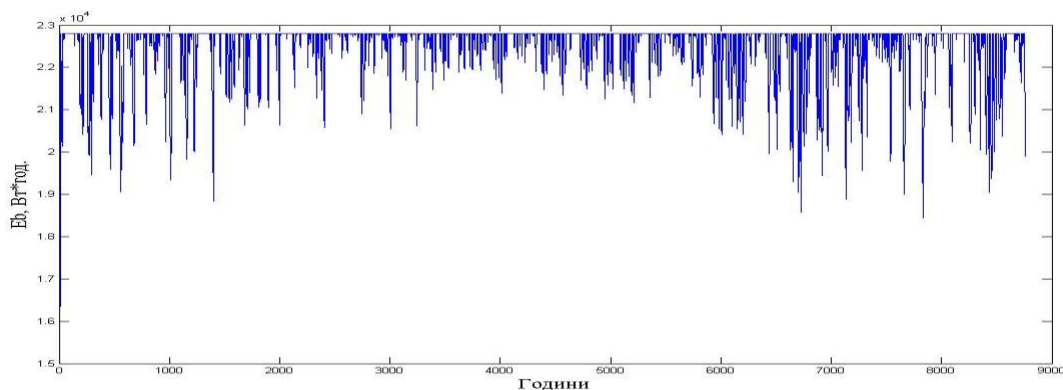
Рис. 3.15. Залежність REPG в автономній ВССЕ від встановлених потужностей ВЕУ та ФЕУ з використанням АБ ємністю 10 А·год

З рис. 3.14 та рис. 3.15 видно, що значення як і DPSP, так і REPG суттєво залежать від встановлених потужностей ВЕУ та ФЕУ. Зменшення дефіциту ЕЕ в ВССЕ можна досягти збільшенням потужностей агрегатів у вітросонячній установці або збільшенням ємності АБ. Зменшення кількості надлишкової ЕЕ в ВССЕ не є важливою проблемою, оскільки у ВССЕ її можна використати для обігріву будинку та гарячого водопостачання.

Щодо моніторингу процесу заряджання та розряджання АБ під час її роботи у складі конкретної ВССЕ було побудовано часову діаграму поточних значень розряджання-заряджання АБ для ємностей 10 та 100 А·год (рис. 3.16).



а)



б)

Рис. 3.16. Поточні значення енергії АБ ємністю 10 А·год (а) та 100 А·год (б) протягом року

З рис. 3.16 видно, що алгоритм керування ВССЕ розроблений таким чином, щоб АБ не перезаряджалась і не розряджалась нижче свого мінімального рівня енергетичної ємності, яке для свинцево-кислотних батарей становить $DOD = 0,5$.

Це зроблено для того, щоб в процесі роботи АБ кількість циклів заряду-розряду останньої не зменшувалася порівняно з паспортною. Ємності АБ 10 А·год виглядає замало для досліджуваної автономної ВССЕ, тому АБ часто розряджається до мінімально допустимого рівня. При ємності 100 А·год АБ жлдного разу повністю не розрядилася, що свідчить про те, що ця ємність є завеликою.

Використовуючи оптимізаційний модуль GA optimization tool програми Matlab, можна легко здійснити параметричну оптимізацію досліджуваної автономної ВССЕ з 4-а варіативними параметрами: $P_{\text{ВЕУ}}, P_{\text{ФЕУ}}, C_{\text{Б}}, \alpha$.

У файл-програмі, до якої звертається ГА, цільову функцію СОЕ описано такою залежністю:

$$\begin{aligned} \text{СОЕ}(P_{\text{ВЕУ}}, P_{\text{ФЕУ}}, C_{\text{Б}}, \alpha) = & \left[P_{\text{ВЕУ}}(B_{\text{ВЕУ}} + 20B_{\text{о.ВЕУ}}) + \right. \\ & + P_{\text{ФЕУ}}(B_{\text{ФЕУ}} + 20B_{\text{о.ФЕУ}}) + C_{\text{Б}}N_{\text{Б}}(B_{\text{Б}} + 20B_{\text{о.Б}}) + \\ & \left. + B_{\text{з.Б}} + (B_{\text{К}} + 20B_{\text{о.К}}) + P_1(B_1 + 20B_{\text{о.1}}) \right] \cdot \frac{1}{\text{CPWF} \cdot \text{TALE}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

де P_1 – потужність інвертора;

$C_{\text{Б}}$ – ємність АБ;

α – кут нахилу ФЕП до горизонту;

$B_{\text{ВЕУ}}$ та $B_{\text{ФЕУ}}$ – ціни за 1 Вт встановленої потужності відповідно ВЕУ та ФЕУ;

$B_{\text{Б}}$ – ціна за 1 А·год АБ;

$B_{\text{К}}$ та B_1 – ціни, відповідно, контролера заряду АБ та інвертора;

$B_{\text{о.ВЕУ}}, B_{\text{о.ФЕУ}}, B_{\text{о.Б}}, B_{\text{о.К}}, B_{\text{о.1}}$ – ціни за річне обслуговування відповідних елементів;

$B_{\text{з.Б}}$ – вартість заміни АБ через 10 років.

На підставі (3.10) $B_{\text{з.Б}}$ можна розрахувати за таким співвідношенням:

$$B_{\text{з.Б}} = X^{10} N_{\text{Б}} (B_{\text{Б}} + 10B_{\text{о.Б}}), \quad (3.12)$$

де $N_{\text{Б}}$ – кількість АБ, що використовуються у ВССЕ.

Також в програмі задано обмеження, за яким дефіцит ЕЕ не повинен перевищувати 5% від кількості споживаної ЕЕ. Діапазони зміни значень параметрів елементів ВССЕ були наступними: $P_{\text{ВЕУ}}$ – від 0 до 10 кВт; $P_{\text{ФЕУ}}$ – від 0 до 10 кВт; $C_{\text{Б}}$ – від 0 до 100 А·год.; α – від 0 до 90°.

У результаті розрахунку було отримано найменше значення СОЕ – 0,1082 \$, яке відповідає наступним оптимальним параметрам елементів ВССЕ: $P_{\text{ВЕУ}} = 2,440$ кВт; $P_{\text{ФЕУ}} = 9,684$ кВт; $C_{\text{Б}} = 41,09$ А·год.; $\alpha = 35,357^\circ$.

3.3. Мережева ВССЕ та її параметрична оптимізація

3.3.1. Алгоритм роботи мережевої ВССЕ. Відповідно до статті 17¹ Закону України «Про електроенергетику» [162], тільки надлишкову генеровану ЕЕ з енергії вітру та енергії сонячного випромінювання об'єктами електроенергетики приватних домогосподарств, встановлена потужність яких не перевищує 30 кВт, держава буде закуповувати за «зеленим» тарифом. Іншими словами, власники приватних домогосподарств будуть отримувати гроші за позитивну різницю між генерованою та спожитою з ЦМЖ ЕЕ. Таким чином, актуальною задачею є розроблення алгоритму роботи мережевої ВССЕ, в якій є два канали генерування ЕЕ від ПДЕ за допомогою ВЕУ з ВВО та ФЕУ (рис. 3.17). Для роботи в ТВМП останні керуються локальними системами РС1 та РС2. Живлення приймачів змінного струму, а також генерування надлишкової ЕЕ в ЦМЖ відбувається з використанням інвертора РС3. Облік спожитої з ЦМЖ та відданої їй ЕЕ відбувається з допомогою двонаправленого лічильника ЕЕ ДЕЛ. Алгоритм роботи такої ВССЕ представлений на рис. 3.18.

У блоці 1 та блоці 2 отримується інформація про рівні потужностей генерування та споживання ЕЕ в даний момент часу. В блоці 3 отримані значення потужностей порівнюються між собою, і, якщо генерована потужність є більшою або рівною бажаній потужності, то споживач отримує живлення від ПДЕ, а надлишкова генерована ЕЕ віддається в ЦМЖ. Якщо ж генерована від ПДЕ потужність не перевищує бажану, то споживач для своїх енергетичних потреб

отримає наявну від ПДЕ кількість ЕЕ, а дефіцит ЕЕ покриється за рахунок використання ЕЕ з ЦМЖ.

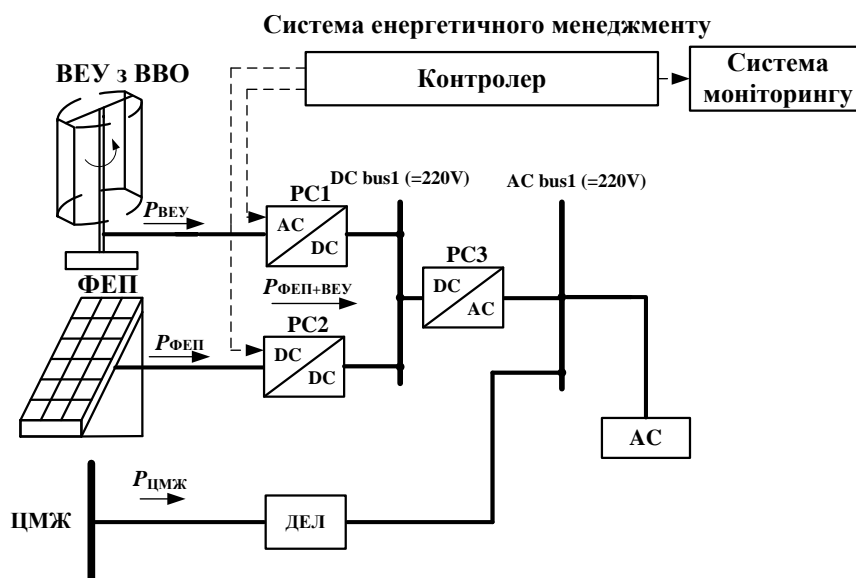


Рис. 3.17. Функціональна схема мережевої ВССЕ



Рис. 3.18. Узагальнений алгоритм роботи мережевої ВССЕ

3.3.2. Алгоритм розрахунку критеріїв енергоефективності мережевої ВССЕ. Значення цільової функції TIOES розраховувалося за таким виразом:

$$TIOES = P_{\text{НАД}} - B_{\text{МЕР}} - TAC, \quad (3.13)$$

де $P_{\text{НАД}}$ – річний прибуток від продажу надлишкової ЕЕ в ЦМЖ за «зеленим» тарифом;

$B_{\text{МЕР}}$ – річна вартість за спожити з ЦМЖ ЕЕ.

$P_{\text{НАД}}$ залежить від сумарної річної кількості надлишкової ЕЕ, відданої в ЦМЖ, $E_{\text{НАД}}$ та розміру «зеленого» тарифу T_3 :

$$P_{\text{НАД}} = E_{\text{НАД}} \cdot T_3. \quad (3.14)$$

Відповідно до постанови № 2044 від 20.07.2015 НКРЕКП України [172], мінімальні розміри «зелених» тарифів для об'єктів електроенергетики – приватних домогосподарств, введених в експлуатацію з 01.07.2015 по 31.12.2015, встановлюються такими:

- для ЕЕ, виробленої з енергії сонячного випромінювання, – 217,47 коп/кВт·год;
- для ЕЕ, виробленої з енергії вітру, – 126,7 коп/кВт·год.

Оскільки в даній ВССЕ ЕЕ буде генеруватися як з енергії вітру, так і з енергії сонячного випромінювання, то в дослідженні було взято розмір «зеленого» тарифу таким, що комбінує два окремі у співвідношенні, пропорційному до встановлених потужностей ВЕУ і ФЕУ:

$$T_3 = \frac{P_{\text{ВЕУ}} \cdot T_{3,\text{В}} + P_{\text{ФЕУ}} \cdot T_{3,\text{С}}}{P_{\text{ВЕУ}} + P_{\text{ФЕУ}}}, \quad (3.15)$$

де $T_{3,\text{В}}$ – розмір «зеленого» тарифу для ЕЕ, отриманої з енергії вітру;

$T_{3,\text{С}}$ – розмір «зеленого» тарифу для ЕЕ, отриманої з енергії сонячного випромінювання.

Алгоритм розрахунку критерію TIOES показано на рис. 3.19.

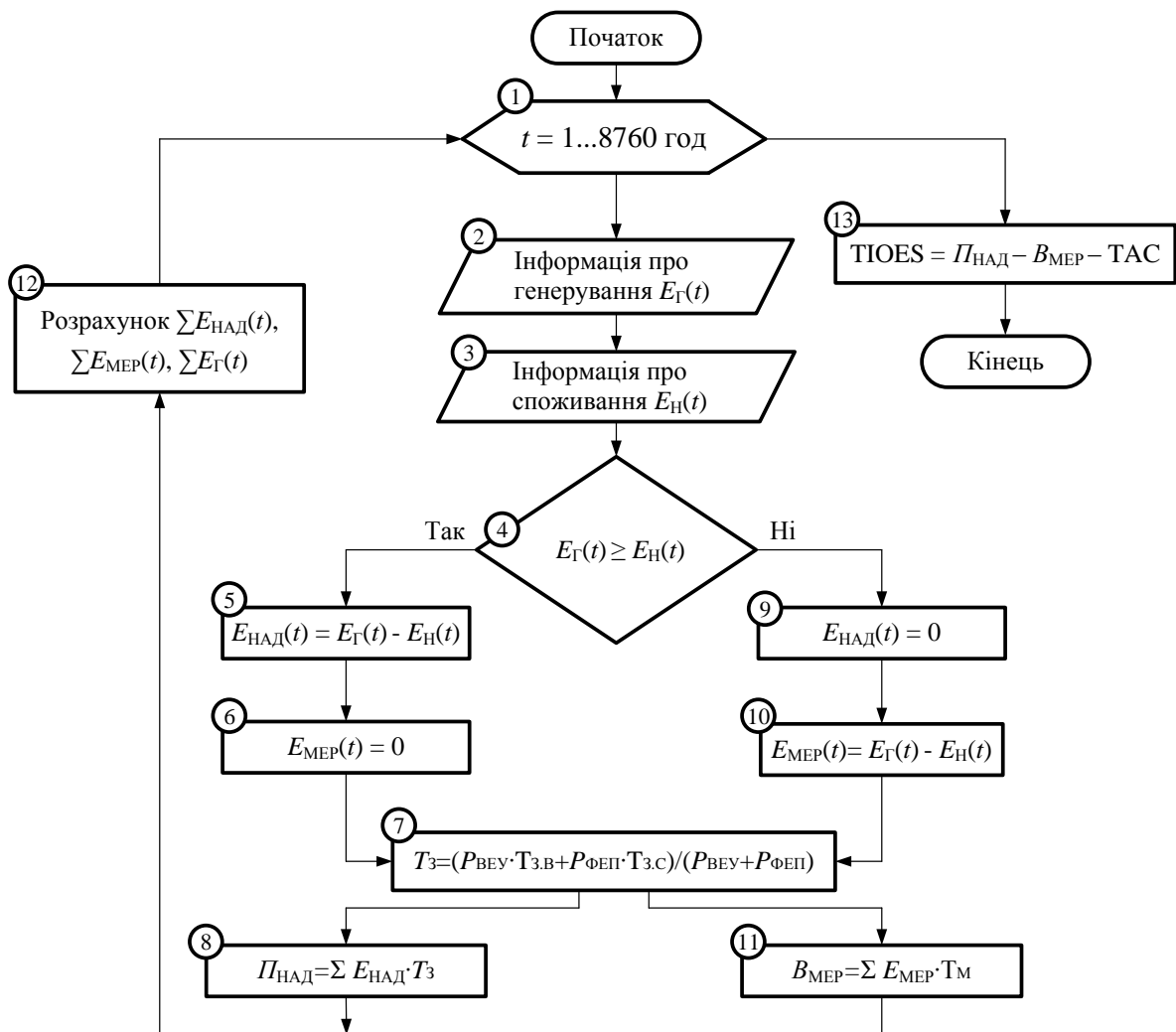


Рис. 3.19. Алгоритм розрахунку цільової функції TIOES для мережевої ВССЕ

Працює алгоритм наступним чином.

У блоці 1 організовано цикл на 8760 год для подальших погодинних розрахунків. У блоці 2 отримуються дані про значення на конкретну годину року сумарної генерованої ВЕУ з ВВО та ФЕУ енергії $E_G(t)$, а у блоці 3 – дані про кількість енергії $E_H(t)$, яка необхідна споживачу в конкретну годину доби. У блоці 4 значення $E_H(t)$ і $E_G(t)$ порівнюються. Для ситуації, коли обсяги генерування ЕЕ від ПДЕ перевищують обсяги споживання ЕЕ, розраховується кількість надлишкової генерованої ЕЕ $E_{НАД}(t)$ (блок 5), і в цей момент споживання ЕЕ від ЦМЖ прирівнюється до 0 (блок 6), оскільки споживач отримує свою порцію ЕЕ від ПДЕ. У блоці 7 розраховується розмір «зеленого» тарифу, по якому буде відбуватись продаж ЕЕ в ЦМЖ. Розрахунок поточного значення прибутку $П_{НАД}$,

отриманого від продажу надлишкової ЕЕ в ЦМЖ за «зеленим» тарифом, проводиться у блоці 8. Якщо ж кількість $E_{Г}(t)$ не перевищує кількість $E_{Н}(t)$, то $E_{НАД}$ прирівнюється до 0 (блок 9), а в блоці 10 розраховується кількість отриманої з ЦМЖ ЕЕ $E_{МЕР}$ з врахуванням того, що будь-яка вироблена ЕЕ ПДЕ теж буде використовуватися споживачем. У блоці 11 розраховується поточне значення річної вартості за спожити ЕЕ з ЦМЖ. У блоці 12 відбувається поточне сумування енергій $\sum E_{НАД}(t)$, $\sum E_{МЕР}(t)$, $\sum E_{Г}(t)$, кінцеві за рік значення яких необхідні для розрахунку значень цільової функції ТІОЕС (блок 13) для конкретної параметричної конфігурації мережевої ВССЕ.

3.3.3. Приклад параметричної оптимізації мережевої ВССЕ. Для моделювання ГЕН споживача, який використовує мережеву ВССЕ, було використано ГЕН об'єкта, що розташований у сільській місцевості Львівської області. Загальне річне споживання ЕЕ є дещо більшим за річне споживання ЕЕ приватним котеджем з використанням ВССЕ повністю автономного електрозабезпечення (приблизно на 1300 кВт·год за рік). Це зумовлено, насамперед, тим, що додатковими електроспоживачами є потрібні в господарстві електроінструменти, а також електроприлади, що використовуються для приготування їжі домашнім тваринам – подрібнювач, комбайн тощо. Добовий ГЕН з посезонною корекцією та часова діаграма річного погодинного споживання ЕЕ при використанні мережевої ВССЕ зображені відповідно на рис. 3.20 та 3.21.

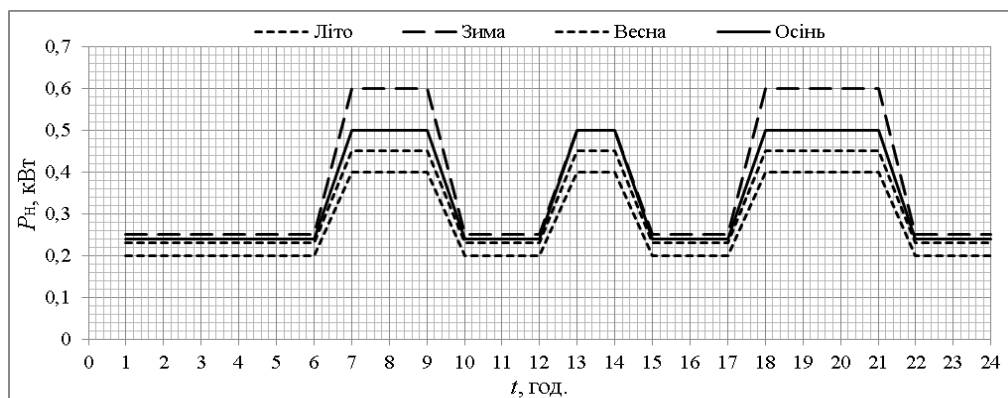


Рис. 3.20. Добовий ГЕН мережевої ВССЕ з посезонною корекцією

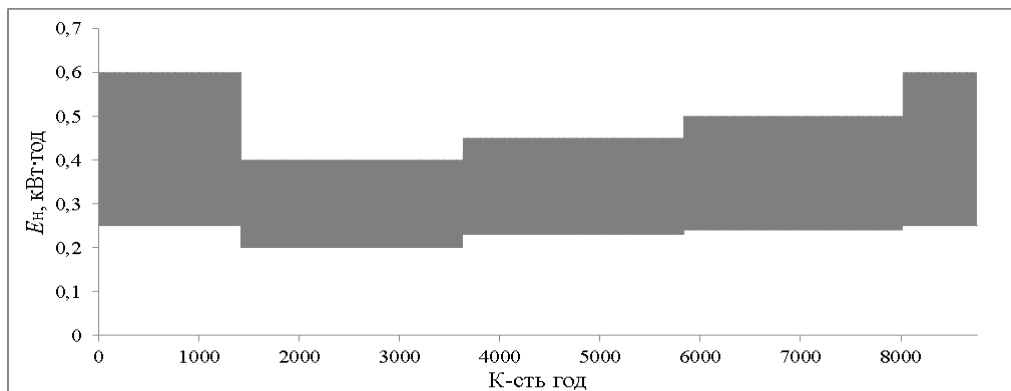


Рис. 3.21. Часова діаграма річного погодинного споживання ЕЕ в мережевій ВССЕ

Як приклад, за розробленим алгоритмом було розраховано та побудовано на рис. 3.22 залежність ТІОЕС від встановленої потужності складових елементів мережевої ВССЕ – $P_{\text{ВЕУ}}$ та $P_{\text{ФЕУ}}$.

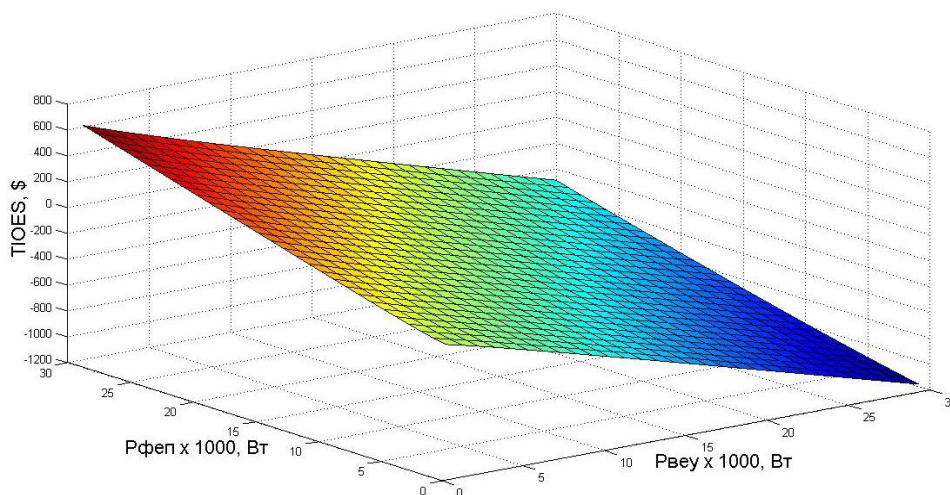


Рис. 3.22. Залежність ТІОЕС від встановленої потужності складових вітросонячної установки мережевої ВССЕ

З залежності видно, що для отримання прибутку від продажу ЕЕ в ЦМЖ за «зеленим» тарифом, варто якомога більше ЕЕ генерувати від ФЕУ. Насамперед, це пов'язано з тим, що «зелений» тариф для енергії вітру є майже у два рази меншим за «зелений» тариф для енергії сонячного випромінювання. По друге, питома (на 1 Вт) вартість ВЕУ з ВВО провідних фірм є значно вищою за питому вартість ФЕП (рис. 3.2, 3.3).

Також, як приклад, було побудовано залежність ТІОЕС від встановленої потужності ФЕУ та від кута нахилу ФЕП до горизонту за їх орієнтації строго на південь та для $P_{\text{ВЕУ}} = 0$ (рис. 3.23).

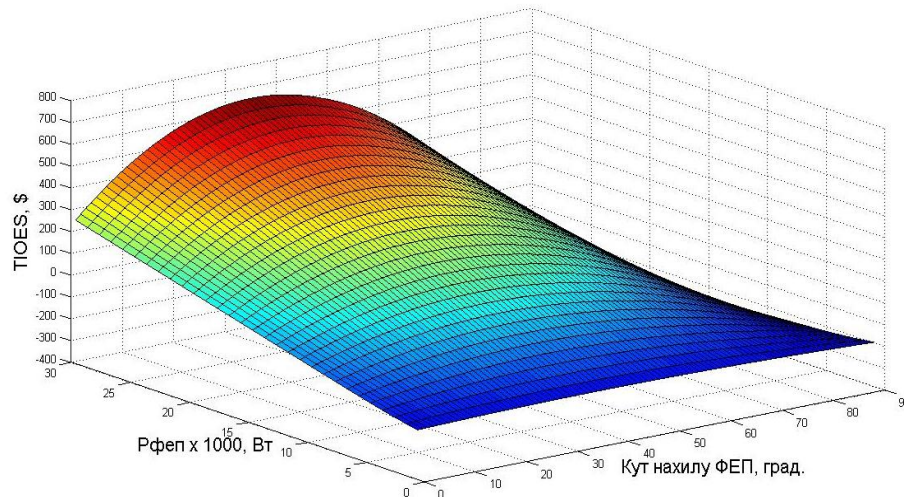


Рис. 3.23. Залежність ТІОЕС від встановленої потужності ФЕП та від кута нахилу ФЕП до горизонту

З рис. 3.23 видно, що від правильності вибору кута встановлення ФЕП до горизонту буде залежати величина прибутку від продажу ЕЕ за «зеленим» тарифом. При $\alpha = 35^\circ$ вже при встановленій потужності ФЕУ, що більша за 15 кВт, споживач зможе отримувати прибуток.

Пошук оптимальних параметрів елементів мережевої ВССЕ з залученням ГА буде відбуватись лише за трьома варіативних параметрів – $P_{\text{ВЕУ}}, P_{\text{ФЕП}}, \alpha$. Таким чином, фітнес-функція мережевої ВССЕ має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \text{TIOES}(P_{\text{ВЕУ}}, P_{\text{ФЕП}}, \alpha) = & \Pi_{\text{НАД}} - B_{\text{МЕР}} - \\ & - [(P_{\text{ВЕУ}}(B_{\text{ВЕУ}} + 20B_{\text{o.ВЕУ}}) + P_{\text{ФЕП}}(B_{\text{ФЕП}} + 20B_{\text{o.ФЕП}}) + \\ & + (P_1 + 20B_{\text{o.1}})] \cdot \frac{1}{\text{CPWF}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Діапазони значень параметрів ВССЕ були наступними: $P_{\text{ВЕУ}}$ – від 0 до 20 кВт; $P_{\text{ФЕУ}}$ – від 0 до 20 кВт; α – від 0 до 90° . Також у програмі було введено обмеження, згідно з яким встановлена потужність ВССЕ не перевищувала 30 кВт.

У результаті розрахунку було отримано максимальне значення ТІОЕС – 257,08 \$, яке відповідає наступним оптимальним параметрам елементів ВССЕ: $P_{BEU} = 0,7$ кВт; $P_{ФЕП} = 17,4$ кВт; $\alpha = 35,2^\circ$.

3.4. Автономно-мережева ВССЕ та її параметрична оптимізація

3.4.1. Алгоритм роботи автономно-мережевої ВССЕ. Через встановлені енергопостачальними компаніями ліміти потужності споживачі, що заживлені до ЦМЖ, змушені терпіти дискомфорт, пов'язаний з дефіцитом ЕЕ. Причинами введення лімітів потужності приєднання є застарілі лінії електропередач, підстанції, що не здатні передавати великі обсяги ЕЕ, а також недбалість власників енергопостачальних компаній чи держави загалом. Тому, для вирішення такої проблеми було запропоновано використання автономно-мережевої ВССЕ (рис. 3.24).

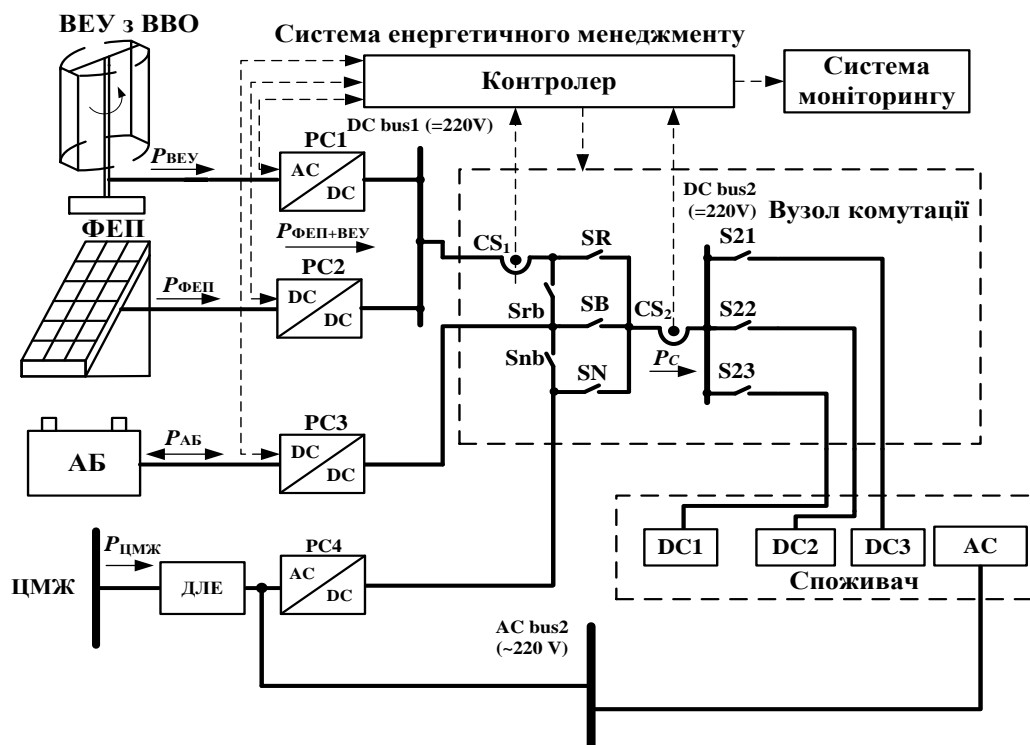


Рис. 3.24. Функціональна схема автономно-мережевої ВССЕ

Така ВССЕ є подібною до автономної ВССЕ (рис. 3.9), але у ній є додаткове джерело постачання ЕЕ – ЦМЖ. Електроприймачі змінного струму АС постійно отримують ЕЕ через двозонний лічильник електроенергії (ДЛЕ), який дає змогу економити кошти, споживаючи ЕЕ в нічний період доби за встановленим пониженим тарифом. Приймачі постійного струму DC1, DC2, DC3 отримують живлення від ВЕУ з ВВО, ФЕУ, та АБ. У випадку дефіциту ЕЕ від ПДЕ вітру і сонця приймачі постійного струму через замкнений ключ SN та випрямляч РСЗ отримують живлення від ЦМЖ. Також в установці, за необхідності, передбачено встановлення АБ. Споживання ЕЕ лише від ЦМЖ приймачами змінного струму виключає використання в схемі дорогого інвертора, але при потребі він може бути встановлений, і споживачі змінного струму зможуть отримувати ЕЕ як від ПДЕ, так і від ЦМЖ.

Для автономно-мережевої ВССЕ розроблено алгоритм керування енергопотоками на вищому рівні (рис. 3.25), який працює таким чином.

Частина алгоритму (перші 7 блоків) є аналогічними до 7 блоків алгоритму автономної ВССЕ (рис. 3.10), роботу яких вже було описано. У 8 блоці проводиться визначення часу доби. Якщо це нічний період доби (23.00-7.00), то у блоці 9 коефіцієнт заряду АБ від ЦМЖ L стає рівним L_n , що відповідає наперед заданому значенню ступеня заряду АБ від ЦМЖ вночі. Якщо блоком 8 визначено денний період доби, то L стає рівним L_d (блок 10), що відповідає наперед заданому значенню ступеня заряду АБ від ЦМЖ вдень. Далі споживач отримує живлення від наявної потужності ПДЕ та від ЦМЖ (блок 11).

У блоці 12 визначається чи АБ є повністю зарядженою, і якщо умова виконується, то надлишкова генерована ЕЕ використовується на інші потреби (блок 6). Якщо умова не виконується, то АБ заряджається від ЦМЖ до наперед заданого рівня (блок 13), в залежності від часу доби (блок 8).

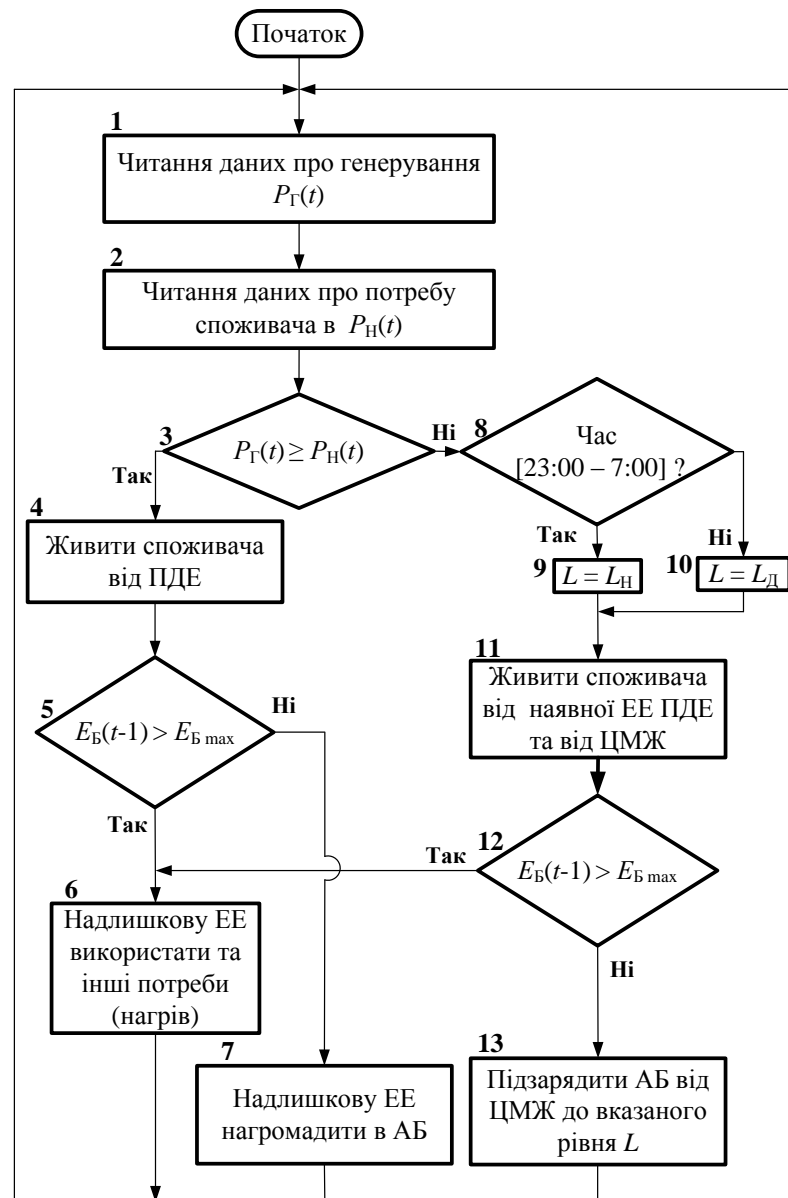


Рис. 3.25. Узагальнений алгоритм роботи автономно-мережевої ВССЕ

3.4.2. Алгоритм розрахунку критеріїв енергоефективності автономно-мережевої ВССЕ. Значення цільової функції для автономно-мережевої ВССЕ COS – річна вартість установки з врахуванням річних витрат на споживання ЕЕ з ЦМЖ – розраховано за таким виразом:

$$COS = TAC + \sum_{i=1}^T B_{MERi}, \quad (3.17)$$

де B_{MERi} – вартість кількості ЕЕ, спожитої з ЦМЖ за i -у годину з врахуванням величини тарифу для цієї години.

Алгоритм розрахунку COS та додаткового показника енергопостачання REPG даної ВССЕ працює наступним чином (рис. 3.26).

У блоці 1 організовано цикл на 8760 год для подальших погодинних розрахунків. У блоці 2 прирівнюються до 0 значення кількості енергії АБ $\Delta E_B(t)$, яка буде отримуватися від ЦМЖ та буде мати різне значення вдень і вночі та обчислюватиметься в блоці 18. У блоці 3 читаються значення сумарної генерованої від ПДЕ на конкретну годину року ЕЕ $E_G(t)$, а у блоці 4 – необхідної споживачу кількості ЕЕ $E_H(t)$. У блоці 5 значення $E_H(t)$ і $E_G(t)$ порівнюються.

Для випадку, коли ЕЕ генерується більше, ніж потрібно споживачеві, $\Delta E_B(t)$ прирівнюється 0 (блок 6). У блоці 7 перевіряється умова повної зарядженості АБ. Якщо АБ заряджена не повністю, то в блоці 8 перевіряється умова можливості прийому АБ зайвої кількості ЕЕ. У випадку можливості її прийому поточне значення заряду АБ буде розраховане, як показано у блоці 11. Коли ж АБ може перезарядитися зайвою кількістю ЕЕ, то у блоці 9 значення $E_B(t)$ прирівнюється до $E_{B_{\max}}$ (АБ повністю заряджена), а у блоці 10 відбудеться розрахунок надлишку ЕЕ $E_{\text{НАД}}(t)$. У випадку, якщо АБ вже була повністю заряджена, умова у блоці 8 не виконується, і поточне значення заряду АБ $E_B(t)$ прирівнюється до свого значення за попередню годину $E_B(t-1) = E_{B_{\max}}$ (блок 12), а надлишок генерованої ЕЕ від ПДЕ розраховується так, як показано у блоці 13.

Якщо ЕЕ генерується менше, ніж потрібно споживачеві, то визначається поточний час доби (блок 14). В залежності від періоду доби у блоках 15 і 16 коефіцієнт заряду АБ від ЦМЖ L стає рівним або L_H (ніч – 23.00-7.00), або L_D (день – 7.00-23.00), що відповідає наперед заданому значенню заряду АБ від ЦМЖ вночі відповідно вночі та вдень. Далі у блоці 17 перевіряється умова досягнення на попередню годину ступенем зарядженості АБ свого верхнього рівня, що визначається сумою значень мінімального заряду АБ $E_{B_{\min}}$ та динамічного розрахункового значення заряду АБ на попередню годину $\Delta E_B(t-1)$.

Якщо верхній ступінь зарядженості АБ ще не досягнутий, то у блоці 18 відбувається розрахунок нового динамічного розрахункового значення заряду АБ $\Delta E_B(t)$, а у блоці 19 розраховується нове значення ступеня зарядженості АБ після

їх дозаряджання від ЦМЖ із заданим допустимим для вибраної ємності АБ струмом заряджання, який задається максимальною годинною енергією заряджання $\Delta E_{B_{\max}}$. Кількість ЕЕ, взятої з ЦМЖ на додаткове живлення споживачів та заряджання АБ за поточну годину розраховується у блоці 20.

Якщо ж верхній ступінь зарядженості АБ вже досягнутий (блок 17), то у блоці 21 значення динамічного розрахункового значення заряду АБ знову стає рівним 0. У блоці 22 визначається чи обсяг можливої для забезпечення потреб споживача нагромадженої в АБ ЕЕ є більшим за значення мінімального заряду АБ $E_{B_{\min}}$. Якщо енергії в АБ достатньо, то споживач її отримує з АБ, і в блоці 25 відбувається розрахунок залишкового поточного значення енергії заряду $E_B(t)$. В іншому випадку споживач отримує усю ще доступну ЕЕ від АБ, і $E_B(t)$ стає рівним $E_{B_{\min}}$ (блок 23). У блоці 24 розраховується кількість ЕЕ, взятої з ЦМЖ на покриття решти потреби споживача. У блоці 26 записаний алгоритм для розрахунку вартості ЕЕ, що була спожита з ЦМЖ. У блоці 27 відбувається поточне сумування енергій $\sum E_{\text{НАД}}(t)$, $\sum E_{\text{МЕР}}(t)$, $\sum E_{\text{Г}}(t)$, кінцеві за рік значення яких необхідні для розрахунку значень цільової функції COS та критерію REPG (блок 28).

Оскільки, в запропонованій автономно-мережевій ВССЕ передбачено використання ДЛЕ, а для розрахунку критерію COS необхідно розрахувати витрати за споживання ЕЕ з ЦМЖ, то для цього було запропоновано та реалізовано в програмному середовищі MATLAB алгоритм розрахунку ціни ЕЕ, отриманої з ЦМЖ. Він базується на основі встановлених місячних лімітів споживання ЕЕ в залежності від опалювального періоду року чи неопалювального, від тарифів на ЕЕ, а також від тарифних коефіцієнтів.

Відповідно до порядку застосування тарифів на ЕЕ, що відпускається населенню і населеним пунктам, затвердженого постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання в сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) від 26.02.2015 р. № 221 розрахунки населення за спожиту ЕЕ за тарифами, що диференційовані за періодами часу, здійснюються за такими тарифними коефіцієнтами [172]: 0,5 в нічний період доби (23.00-7.00); 1,0 в решта годин доби.

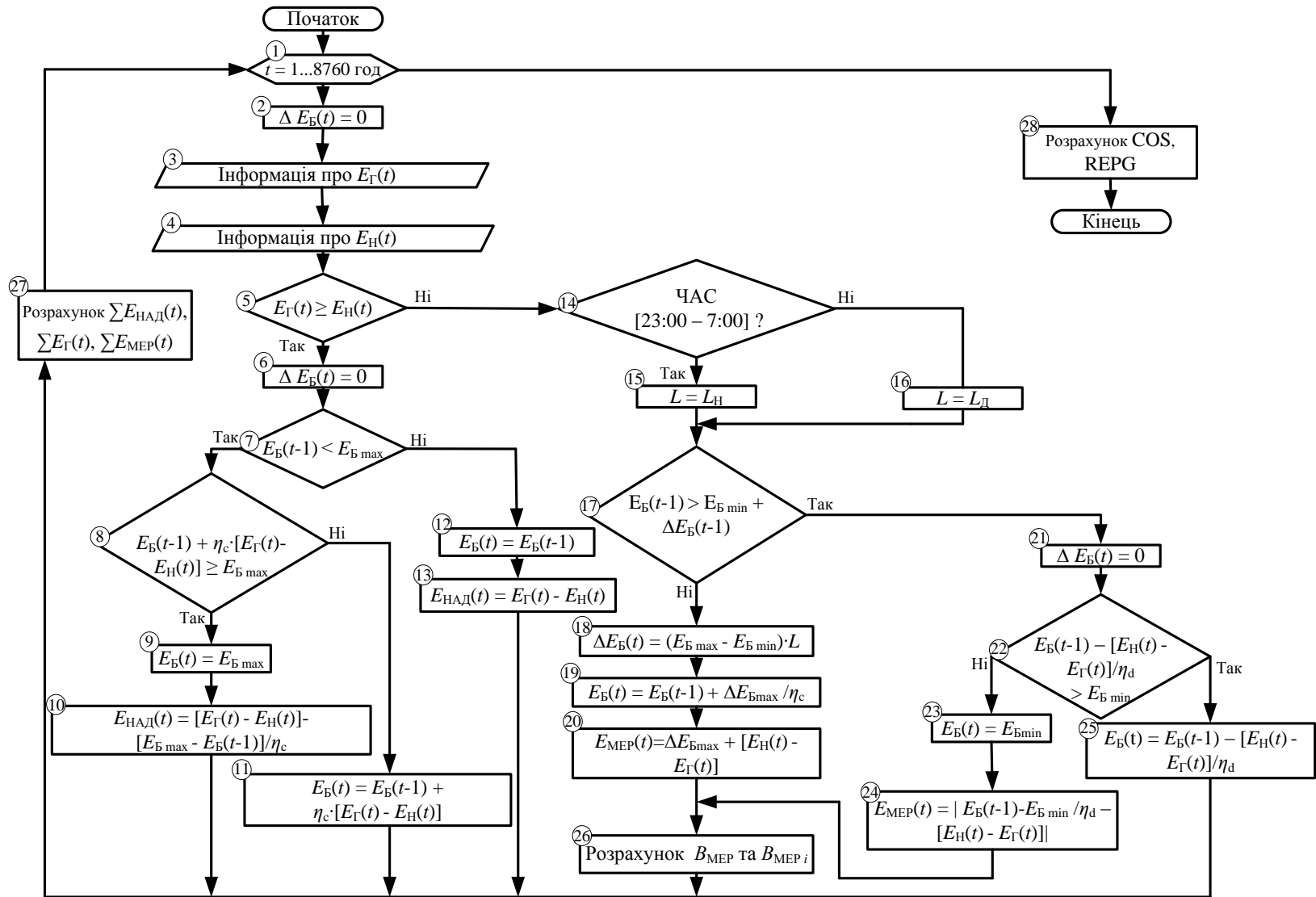


Рис. 3.26. Алгоритм розрахунку значень заряду АБ, надлишку ЕЕ, а також показників COS та REPG в автономно-мережевій ВССЕ

Також, відповідно до вищевказаної постанови, для населення встановлюються наступні тарифи на ЕЕ [173]:

1. У неопалювальний сезон (1.05 – 30.09):
 - якщо місячний обсяг споживання ЕЕ не перевищує 100 кВт·год, то тариф на ЕЕ встановлюється в розмірі 0,90 грн. за кВт·год;
 - якщо місячний обсяг споживання ЕЕ перевищує 100 кВт·год, то тариф на ЕЕ встановлюється в розмірі 1,68 грн. за кВт·год.
2. В опалювальний сезон (1.10 – 30.04):
 - якщо місячний обсяг споживання ЕЕ не перевищує 3000 кВт·год, то тариф на ЕЕ встановлюється в розмірі 0,90 грн. за кВт·год;
 - якщо місячний обсяг споживання ЕЕ перевищує 3000 кВт·год, то тариф на ЕЕ встановлюється в розмірі 1,68 грн. за кВт·год.

Тарифи на ЕЕ, що буде відпускатися населенню бралися станом на 01 березня 2017 року, оскільки, згідно вищевказаної постанови НКРЕКП, до цієї дати тарифи будуть постійно змінюватися.

Алгоритм розрахунку річної вартості ЕЕ, що отримується споживачем приведено на рис. 3.27. Він працює наступним чином.

У блоці 1 відбувається визначення періоду року, в який споживач живиться ЕЕ від ЦМЖ, і в залежності від опалювального чи неопалювального сезону встановлюється місячний ліміт споживання ЕЕ $Lim_{оп.с}$ (блок 2) чи $Lim_{неоп.с}$ (блок 3). У блоці 4 сумарна кількість спожитої за місяць ЕЕ порівнюється із значенням ліміту електроспоживання Lim для відповідного періоду року. Якщо обсяги місячного споживання ЕЕ від ЦМЖ перевищують відповідний ліміт, то для подальшого розрахунку вартості ЕЕ встановлюється високий тариф на ЕЕ T_{M1} (блок 5), а якщо ні, то встановлюється низький тариф – T_{M2} (блок 6).

Далі, у блоці 7, відбувається визначення періоду доби, в яку споживач отримує живлення від ЦМЖ, і в залежності від нього враховується денний L_D (блок 8) чи нічний L_N (блок 9) тарифні коефіцієнти. У блоках 10 та 11 розраховуються, відповідно, погодинна вартість ЕЕ, отриманої з ЦМЖ V_{MERi} , та нагромаджується сумарна вартість ЕЕ за рік.

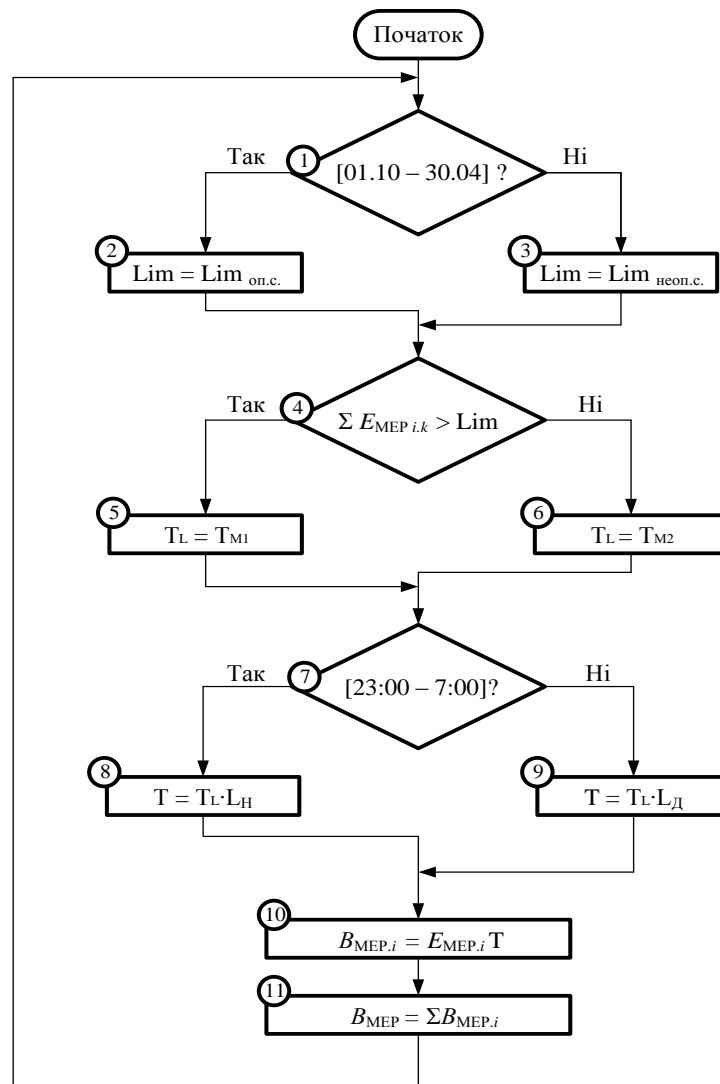


Рис. 3.27. Алгоритм розрахунку річної вартості спожитої ЕЕ від ЦМЖ

3.4.3. Приклад параметричної оптимізації автономно-мережевої ВССЕ.

Для автономно-мережевої ВССЕ було обрано сучасний варіант, коли в індивідуальному будинку повністю відсутнє газопостачання, і тому споживач для обігріву будинку використовує одноконтурний електричний котел. Оскільки у споживача постійно є необхідність у гарячому водопостачанні, то одноконтурний котел буде використовуватись у парі з електричним бойлером.

Отож, було взято одноконтурний електричний котел з номінальною потужністю 18 кВт і вважалось, що він буде працювати тільки в опалювальний сезон, тобто з 1 жовтня до 30 квітня включно. Помісячна інтенсивність його роботи задавалась наступними значеннями коефіцієнта використання потужності

котла: жовтень – 0,2; листопад – 0,3; грудень – 0,4; січень – 0,5; лютий – 0,45; березень – 0,3; квітень – 0,2. Гаряча вода в будинку використовувалась зранку з 7.00 до 9.00 та ввечері з 19.00 до 21.00. Для розрахунку кількості ЕЕ W_B , що витрачається на підігрів води, було використано наступне співвідношення:

$$W_B = \frac{c_B \rho_B V_{Г.В.} (\theta_{B^*} - \theta_{ВП}) n_{Ж}}{3,6 \cdot 10^6} \text{ [кВт}\cdot\text{год]}, \quad (3.18)$$

де c_B – питома теплоємність води, Дж/(кг·°С);

ρ_B – густина води, кг/м³;

$V_{Г.В.}$ – об'єм гарячої води, який необхідний для однієї особи на день, л;

θ_{B^*} – бажана температура, до якої необхідно нагріти воду, °С;

$\theta_{ВП}$ – температура води у водопроводі, °С;

$n_{Ж}$ – кількість жителів в індивідуальному будинку.

Також до ГЕН додалось додаткове електроспоживання через використання кондиціонера влітку. Було вибрано кондиціонер з номінальною потужністю 5 кВт і вважалось, що він буде працювати лише влітку. Місячні коефіцієнти використання потужності кондиціонера для літнього періоду було взято такими: червень – 0,7; липень – 1,0; серпень – 0,8.

За вказаним вихідними даними було сформовано добовий і сезонний ГЕН (рис. 3.28) та діаграму річного погодинного споживання ЕЕ (рис. 3.29).

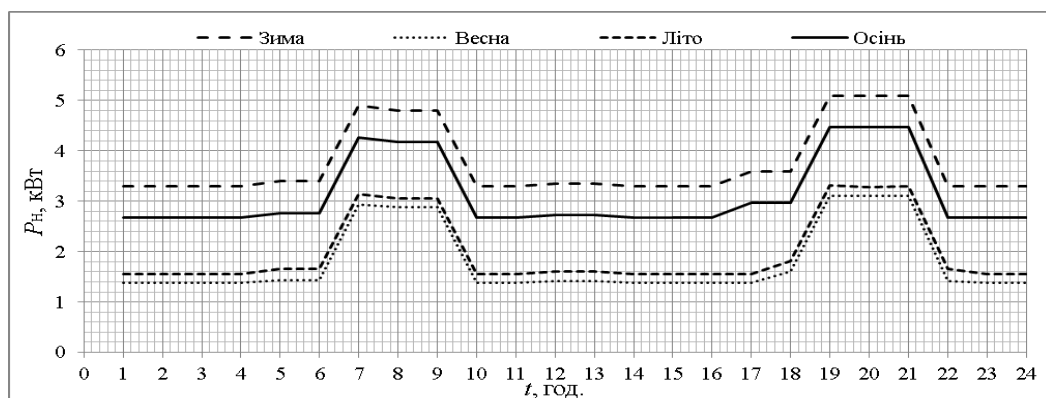


Рис. 3.28. Добовий ГЕН в автономно-мережевій ВССЕ з посезонною корекцією

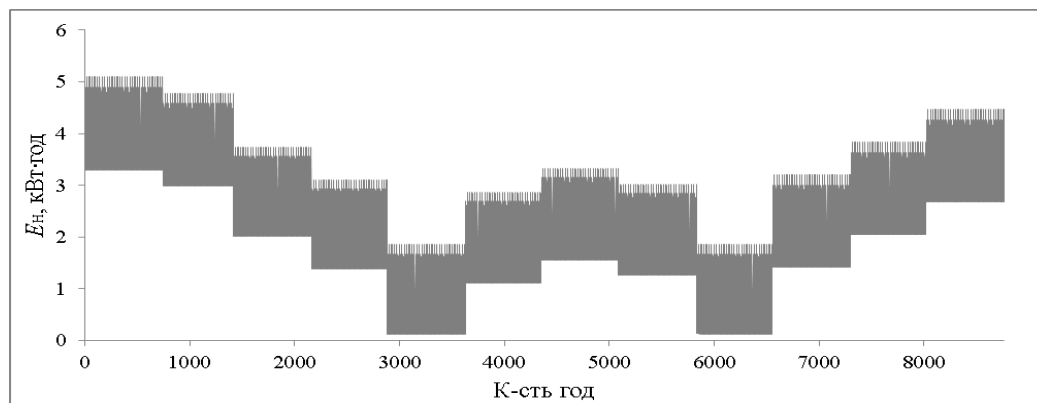


Рис. 3.29. Діаграма річного погодинного споживання ЕЕ в автономно-мережевій ВССЕ

Для прикладу, за вищенаведеними алгоритмом (рис. 3.26) та відповідно до ГЕН споживача в середовищі Matlab було розраховано (текст програми наведено у Додатку Б) та побудовано у вигляді 3D поверхні залежність значень цільової функції COS від сумарної встановленої потужності ВЕУ з ВВО та ФЕУ (рис. 3.30). Ємність АБ було взято зі значенням 100 А·год.

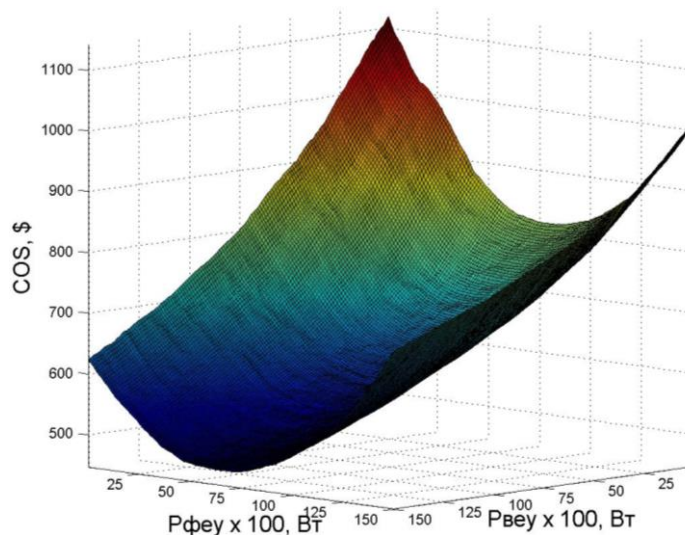


Рис. 3.30. Залежність COS від встановленої потужності ВЕУ з ВВО та ФЕУ в автономно-мережевій ВССЕ з використанням АБ ємністю 100 А·год

З аналізу тривимірної поверхні (рис. 3.30) можна отримати найменше значення COS, якому будуть відповідати деякі значення варіативних параметрів

ВССЕ – потужностей ВЕУ та ФЕУ, але за умови постійності інших варіативних параметрів – ємності АБ, кута нахилу ФЕП до горизонту, показників ступеню заряджання АБ від ЦМЖ вдень та вночі. Для знаходження значення критерію COS за умови варіативності всіх можливих параметрів необхідно залучити оптимізаційні процедури, тобто ГА.

У даному випадку фітнес-функція – COS, що записана у файл-програмі, до якої звертається ГА, відрізняється від СОЕ (цільова функція автономної ВССЕ) тим, що до вартості установки необхідно додати також річні затрати на ЕЕ $V_{\text{МЕР}}$, що споживається з ЦМЖ. Функцію можна описати таким співвідношенням:

$$\begin{aligned} \text{COS}(P_{\text{ВЕУ}}, P_{\text{ФЕУ}}, C_{\text{Б}}, \alpha, L_{\text{Д}}, L_{\text{Н}}) = & [P_{\text{ВЕУ}}(B_{\text{ВЕУ}} + 20B_{\text{о.ВЕУ}}) + \\ & + P_{\text{ФЕУ}}(B_{\text{ФЕУ}} + 20B_{\text{о.ФЕУ}}) + C_{\text{Б}}N_{\text{Б}}(B_{\text{Б}} + 20B_{\text{о.Б}}) + \\ & + B_{\text{з.Б}} + (B_{\text{К}} + 20B_{\text{о.К}}) + P_{\text{І}}(B_{\text{І}} + 20B_{\text{о.І}})] \cdot \frac{1}{\text{CPWF}} + V_{\text{МЕР}} \end{aligned} \quad (3.19)$$

У програмі було задано, що курс долара США рівний 23 грн. Діапазони значень параметрів ВССЕ були наступними: $P_{\text{ВЕУ}}$ – від 0 до 15 кВт; $P_{\text{ФЕУ}}$ – від 0 до 15 кВт; $C_{\text{Б}}$ – від 0 до 100 А·год.; α – від 0 до 90°; $L_{\text{Д}}$ та $L_{\text{Н}}$ – від 0 до 1.

У результаті розрахунку було отримано найменше значення COS – 470,17 \$, яке відповідає таким оптимальним параметрам елементів ВССЕ: $P_{\text{ВЕУ}} = 14814$ Вт; $P_{\text{ФЕП}} = 6357$ Вт; $C_{\text{Б}} = 95,4$ А·год.; $\alpha = 55,47^\circ$; $L_{\text{Д}} = 0,353$; $L_{\text{Н}} = 0,903$.

Також, для підтвердження того, що такі системи є актуальними для впровадження в Україні, навіть, при високому курсі валюти, було розраховано за алгоритмом (рис. 3.27), який теж використовується як прикладна програма, сумарну річну ціну ЕЕ, якщо споживач з прийнятим ГЕН (рис. 3.28) буде отримувати живлення тільки від ЦМЖ. У цьому випадку він заплатить за річне споживання ЕЕ з ЦМЖ 1184,8 \$, в той час як використовуючи автономно-мережеву ВССЕ буде витратити майже втричі меншу кількість грошей.

3.5. Висновки до розділу

1. Проведено аналіз автономної, мережевої та автономно-мережевої

ВССЕ і для кожної з систем сформовано цільові функції з метою їх техніко-економічної оптимізації.

2. Для прийняти об'єктивного рішення щодо вибору параметрів складових елементів ВССЕ запропоновано використання ГА, який дає змогу оперативно розв'язувати оптимізаційні задачі.

3. Представлено алгоритми роботи трьох перспективних структур ВССЕ, а також розроблено алгоритми для розрахунку цільових функцій та інших показників енергоефективності для кожної з них.

4. Розроблено прикладні програми в середовищі Matlab, у яких, відповідно до алгоритму обраної ВССЕ та ГЕН споживача, розраховуються погодинні перетоки ЕЕ між вузлами системи та розраховуються показники енергоефективності. Як вхідна інформація для розрахунків генерованої від ПДЕ ЕЕ використано ЕБМД, що була розроблена в попередньому розділі.

5. Сформовано електронну базу даних з поточними цінами на основні елементи ВССЕ, яка є вхідною інформацією для проведення кошторисного аналізу ВССЕ.

6. Наведено конкретні приклади параметричної оптимізації для трьох перспективних структур ВССЕ з використанням ГА, які дають змогу рекомендувати перспективні напрямки застосування кожної із структур.

РОЗДІЛ 4

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ КЕРОВАНОЇ ВІТРОСОНЯЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОКРЕМОГО ОБ'ЄКТА

У розділі представлено результати імітаційного математичного моделювання та симуляційних комп'ютерних досліджень аеродинамічних процесів роботи ВР з ВВО та ВР з ВВО в поєднанні з КВП за допомогою CFD. На їх основі знайдено раціональні параметри конструкції ВЕУ для роботи на малих вітрах. За результатами математичного моделювання і дослідження ефективних способів електричного навантаження СГПМ у ВЕУ з ВВО запропоновано ефективний комбінований активно-пасивний спосіб електричного навантаження. Обґрунтовано ефективний для Львівської області спосіб наведення ФЕП на сонце та знайдено його оптимальні параметри.

Результати досліджень даного розділу опубліковано в роботах автора [92, 132, 164, 170].

4.1. Математичне моделювання та імітаційні дослідження аеродинамічних процесів у ВР з ВВО та стаціонарним КВП

Метою даного дослідження є пошук, шляхом математичного моделювання та комп'ютерного дослідження аеродинамічних процесів, високоефективної конструкції ВЕУ з ВВО, що буде оптимально працювати на малих вітрах.

Математичне моделювання аеродинамічних процесів є першочерговим кроком, оскільки результати моделювань показують ефективність тих чи інших конструктивних рішень та дають можливість визначити оптимальні параметри конструкції ВЕУ з ВВО. Тому дослідження аеродинамічних процесів під час роботи ВР з ВВО, що проводяться на математичних моделях, повинні бути якомога точнішими. Цієї точності можна досягнути при використанні CFD аналізу та відповідних прикладних програм. Крім того, аналіз аеродинамічних

процесів ВР з ВВО з використанням CFD є значно дешевшим в порівнянні з тестуванням готових моделей в аеродинамічних тунелях, проте потребує потужних обчислювальних ресурсів та розуміння процесів аеромеханіки, що відбуваються у ВЕУ.

4.1.1. Методика математичного моделювання аеродинамічних процесів з використанням CFD. Основними етапами методики є препроцесорна обробка та постпроцесорна обробка (рис. 4.1).

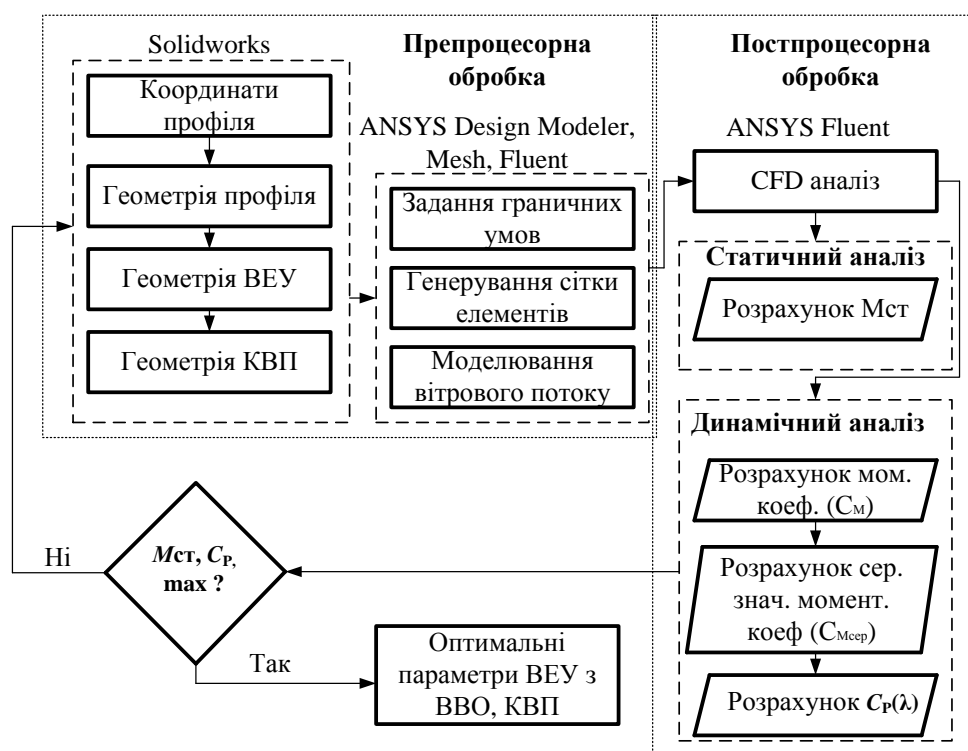


Рис. 4.1. Схема методики проведення CFD аналізу різних конфігурацій ВР з ВВО в поєднанні з КВП

Препроцесорна обробка включає в себе побудову геометрії лопатей NASA, ВР з ВВО, КВП, а також генерування скінченно-елементної сітки об'єкта, що далі буде досліджуватися з використанням CFD аналізу. Для побудови геометрії об'єкта було використано моделювальне середовище Solidworks. Координати досліджуваних лопатей NASA у в.о. були отримані з офіційного електронного сайту виробника лопатей NASA [108]. Для задавання граничних умов протікання

рідини (вітрового потоку) через об'єкт і створення скінченно-елементної сітки були використані, відповідно, ANSYS Design Modeler та ANSYS Mesh. Моделювання поля вітропотoku різних швидкостей було зроблено з використанням двовимірних математичних моделей у ANSYS Fluent. Результати, отримані з використанням тривимірних математичних моделей є точнішими [9], проте для таких досліджень потрібні надпотужні комп'ютерні кластери. Схематичні зображення досліджуваних трилопатевих ВР, що були побудовані в Solidworks, представлено на рис. 4.2.

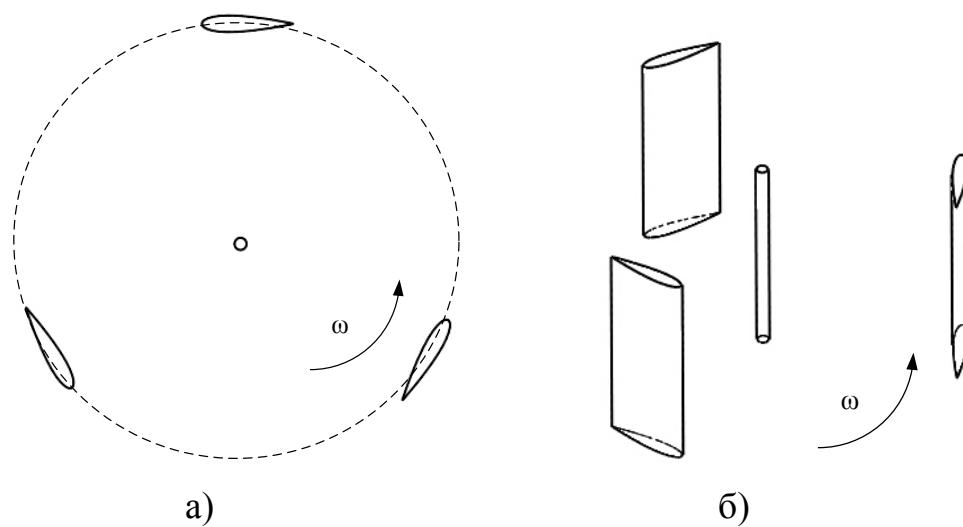


Рис. 4.2. Схематичне зображення досліджуваного Н-ротора ВЕУ:

а) двовимірне; б) тривимірне

Потік вітру через ВР ВЕУ характеризується створенням вихорів, а також появою турбулентності [124, 154], тому для моделювання вітропотoku, який буде обмітати ВР, має бути використана така модель турбулентності, яка буде найбільш подібною до реального процесу. Такою моделлю турбулентності є k-ε “realizable” модель, яка, як правило, використовується у випадках дослідження ВР ВЕУ, що обертаються [55]. Ця модель є покращеною k-ε моделлю і широко застосовується там, де необхідно швидко та максимально реально змоделювати процес проходження рідини чи вітру. Дослідження [104] показують, що ця модель є найбільш прогресивною серед інших версій k-ε моделей, тому вона була використана в даному дослідженні.

Процес генерування скінченно-елементної сітки об'єкта є найбільш трудомістким та важливим кроком препроцесорної обробки, оскільки від якості генерованої сітки елементів будуть залежати результати подальших математичних моделювань. У залежності від складності об'єкту сітка елементів може бути як структурованою, так і неструктурованою [55]. У даному дослідженні використовувалась неструктурована сітка, основною перевагою якої є властивість дрібно розташовуватись навколо дуже складних чи неправильних за формою об'єктів, наприклад, навколо профілів ВР чи КВП, як буде показано далі.

Постпроцесорна обробка є фінальним етапом у CFD аналізі. Вона включає візуалізацію результатів, отриманих шляхом математичного моделювання аеродинамічних процесів у ВР з ВВО, і в даному дослідженні для цього використовувався ANSYS Fluent.

Для дослідження стартових властивостей ВР з ВВО та ВР в поєднанні з КВП, проводилося моделювання статичних аеродинамічних процесів, коли ВР не обертається. Моделювання полягало у розрахунку з використанням CFD значень стартових моментів $M_C(\psi)$ для різних азимутальних положень ВР ВЕУ та ВР з використанням КВП. Для дослідження робочих характеристик ВР з ВВО та ВР в поєднанні з КВП (коефіцієнта відбору потужності від вітру C_p для різних швидкохідностей ВР λ), проводилося моделювання динамічних аеродинамічних процесів, коли ВР обертався. Моделювання полягало у розрахунку миттєвих моментних коефіцієнтів $C_M(\psi)$, що були вхідними даними для розрахунку середніх за оберт ВР значень моментів $M_{сер}$ та відповідних їм моментних коефіцієнтів.

4.1.2. Математичне моделювання статичних і динамічних режимів роботи Н-ротора для макетного взірця ВЕУ з ВВО. На основі аналізу літературних джерел було встановлено, що трилопатевий Н-ротор з симетричним профілем NASA 0018 має добрі як стартові характеристики, так і робочі, тому його було взято за базовий у дослідженнях. Координати профілю у в.о. приведено у додатку В. Фрагмент поля скінченно-елементної сітки, на яку розбивались

динамічна та статична зони для дослідження трилопатевого ВР, показано на рис. 4.3. Для створення умов проходження вітру через ВР у обчислювальному полі (математично змодельований аеродинамічний тунель), а також для забезпечення обертання ВР з певною кутовою швидкістю, були задані відповідні параметри поля (табл. 4.1) (зона притоку, витоку і т.д.) у ANSYS Mesh (рис. 4.4).

Таблиця 4.1

Параметри моделювань з використанням CFD

1	Густина повітря	1,225 кг/м ³
2	В'язкість повітря	1,7894·10 ⁻⁵ Па·с
3	Швидкість руху повітряної маси	4, 7, 10 м/с
4	Атмосферний тиск	101325 Па
5	Модель турбулентності	k-ε realizable
6	CFD алгоритм	Simple
7	Похибка збіжності	1·10 ⁻⁴
8	Схема інтерполяції	Другий порядок
9	Вимірність простору	2D
10	Координатна система	Декартова (X,Y,Z)
11	Тиск у зоні витоку	0 Па
12	Кінетична енергія турбулентності	1 м ² /с ²
13	Швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії	1 м ² /с ³

Моделювання проводились для швидкостей вітру 4, 7, 10 м/с. Під час моделювань незмінними були параметри ВР (табл. 4.2).

Оскільки коефіцієнт заповнення ВР лопатями σ є параметром, який впливає як на стартові можливості ВР, так і на його швидкохідність [89, 104, 137], то було проведено дослідження щодо обґрунтування раціонального для заданого ВР значення σ . Вибір σ проводився серед трьох його значень (0,12, 0,15 та 0,2) при швидкості вітру 4 м/с. Значення λ змінювалось від 0,5 до 2,5 з кроком 0,5.

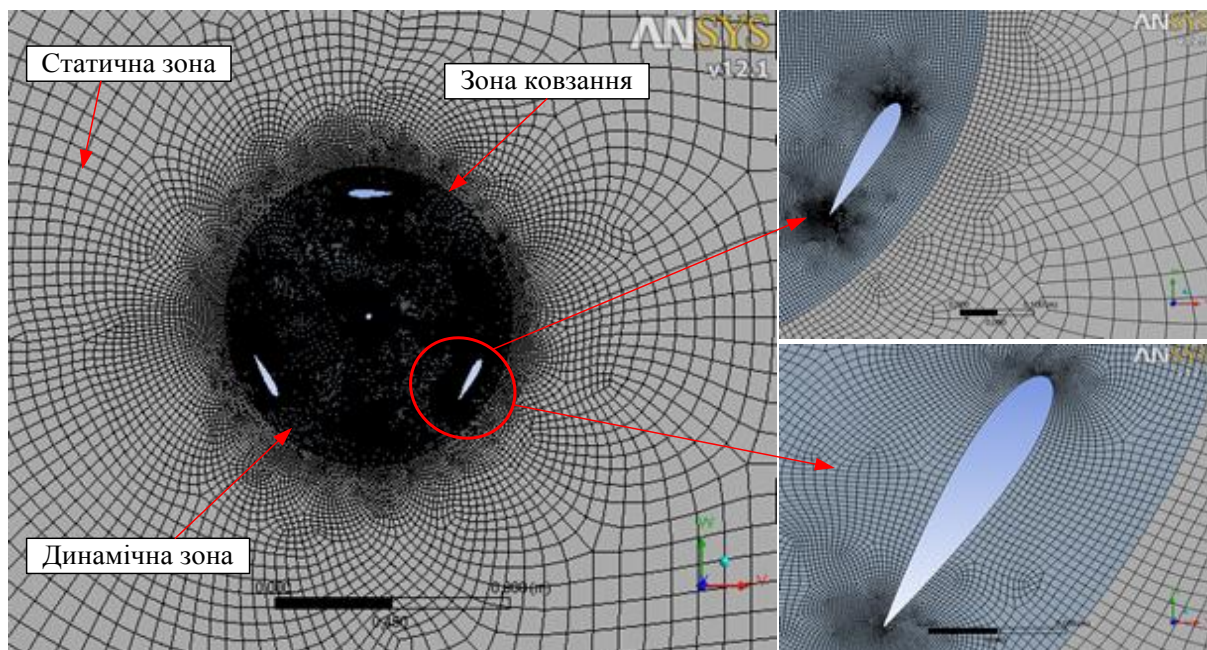


Рис. 4.3. Приклад двовимірної скінченно-елементної сітки моделі ВР

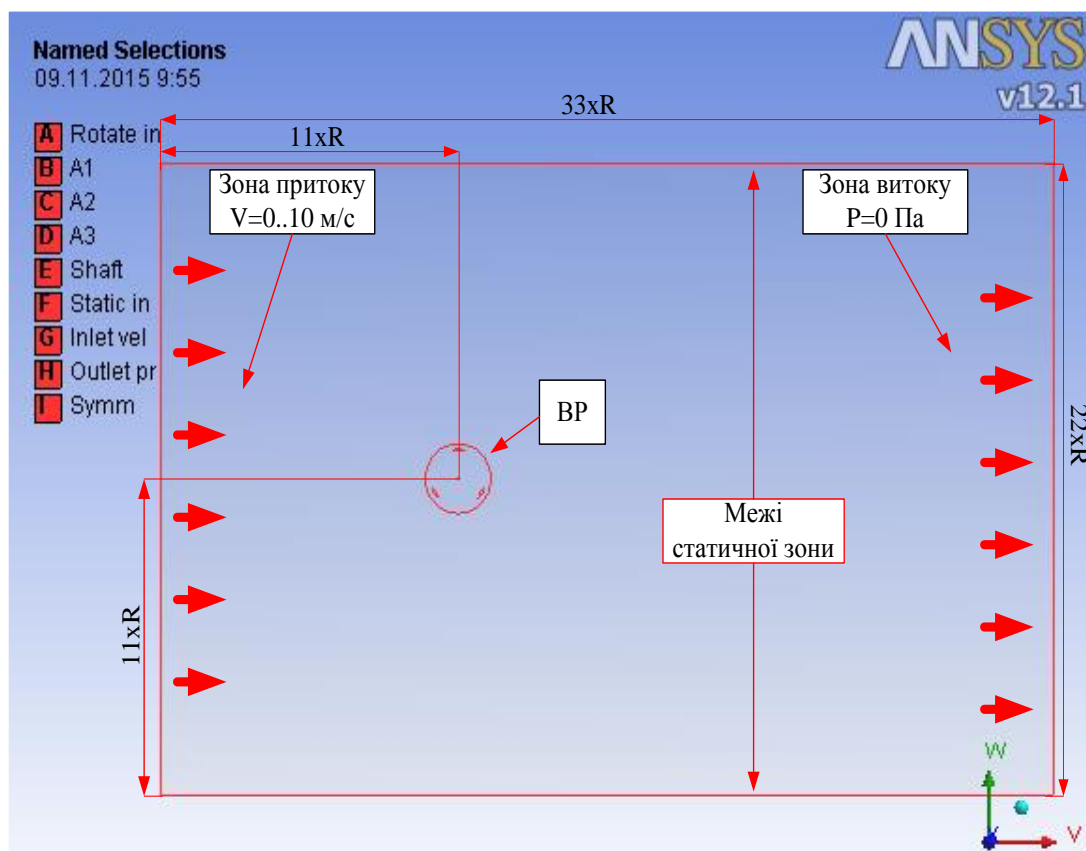


Рис. 4.4. Схема задавання граничних умов та розміри математичної моделі ВР

Параметри ВР, що досліджувався, для макетного взірця ВЕУ

1	Тип ВР	Н-ротор
2	Кількість лопатей	3
3	Тип лопаті	NACA 0018
4	Радіус ВР	0,45 м
5	Коефіцієнт заповнення σ	0,12; 0,15; 0,2
6	Висота лопаті	1,0 м

Відповідно до виразу (1.17), в ANSYS Fluent проводився розрахунок значення миттєвого моментного коефіцієнта $C_M(\psi)$ при певній швидкохідності ВР, проте далі, для отримання значення коефіцієнта відбору потужності від вітру, необхідно було визначити середнє значення C_M . Часовий крок Δt_p розрахунку $C_M(\psi)$ був вибраний 0,01 с. Це означає, що, наприклад, при $\lambda = 0,5$ і, відповідно, $\omega = 4,4$ рад/с ВР здійснював один повний оберт за $t_{об} = 2\pi/\omega = 1,414$ с. Відповідно, кутовий крок дискретизації розрахунку $C_M(\psi)$ становив $\Delta t_p \cdot 360^\circ / t_{об} = 2,55^\circ$. Таким чином, наприклад, для значення $\sigma = 0,15$ була отримана залежність $C_M(\psi)$, показана на рис. 4.5.

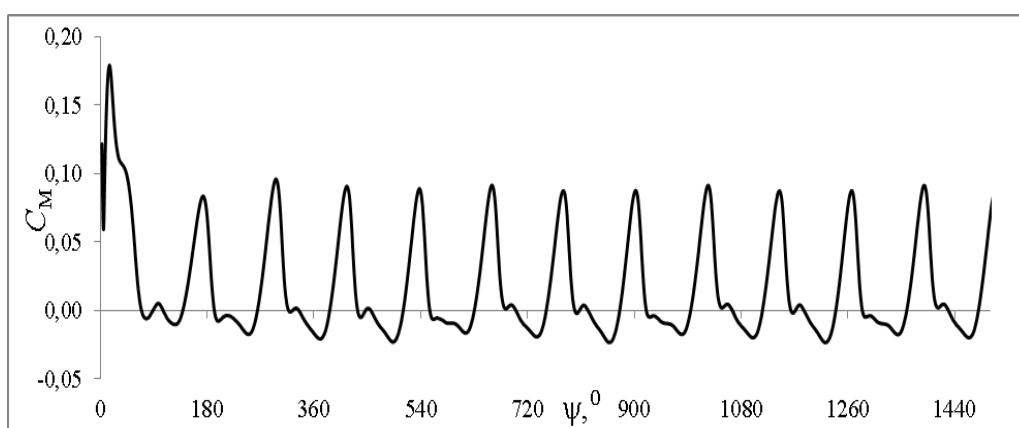


Рис. 4.5. Залежність миттєвого значення C_M для макетного взірця ВР від його азимутального розташування

Середнє значення C_M за оберт обчислювалось для періоду, коли, у фізичному розумінні, робота ВР характеризувалась аеродинамічною стабільністю, а в математичному – різниця значень $C_M(\psi)$ між попереднім і поточним періодами була меншою від заданої похибки збіжності $C_M(\psi)$ (повний оберт ВР в період з 1080° до 1440°).

На рис. 4.7 наведено окремі результати моделювань аеродинамічних процесів ВР з ВВО зі швидкістю вітру 4 м/с.

Результати моделювання динамічних характеристик досліджуваного ВР з різними значеннями коефіцієнта заповнення ВР лопатями σ приведено на рис. 4.7. Аналізуючи отримані залежності $C_p(\lambda)$, можна сказати, що σ зі значенням 0,2 є найкращим, коли треба забезпечити добрий старт ВР. Проте, ВР з таким значенням σ характеризується нижчим значенням $C_{pmax} = 0,112$, яке досягається при меншій швидкохідності $\lambda_{opt} = 1,2$ в порівнянні з $\sigma = 0,12$. Залежність $C_p(\lambda)$ для ВР з $\sigma = 0,15$ є проміжним варіантом, коли ВР добре поєднує як показники для старту, так і для оптимальної роботи ($C_{pmax} = 0,132$), причому при більшій швидкохідності ($\lambda_{opt} = 1,9$). Тому, у подальших дослідженнях використовувався ВР із значенням $\sigma = 0,15$.

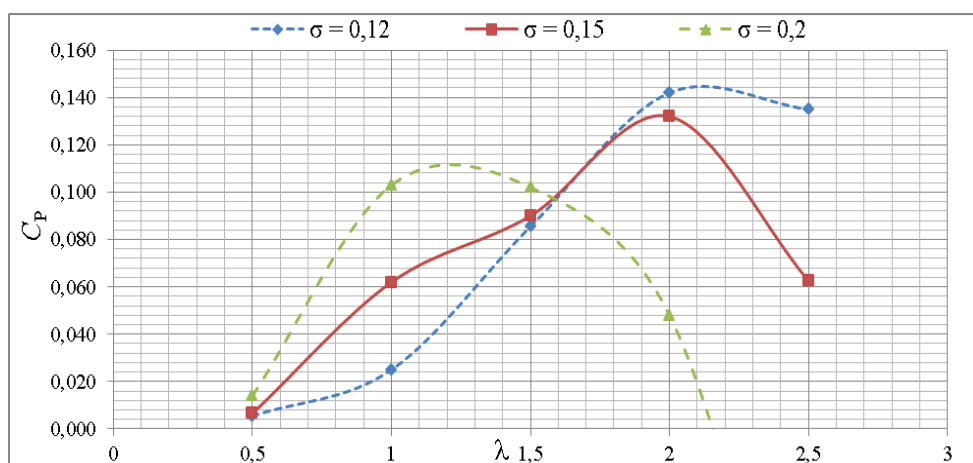
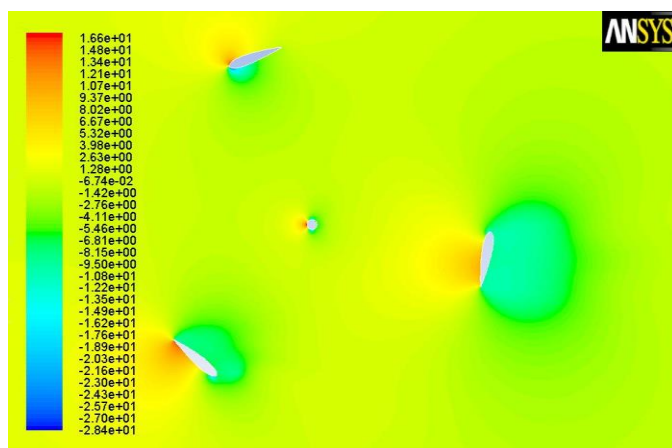
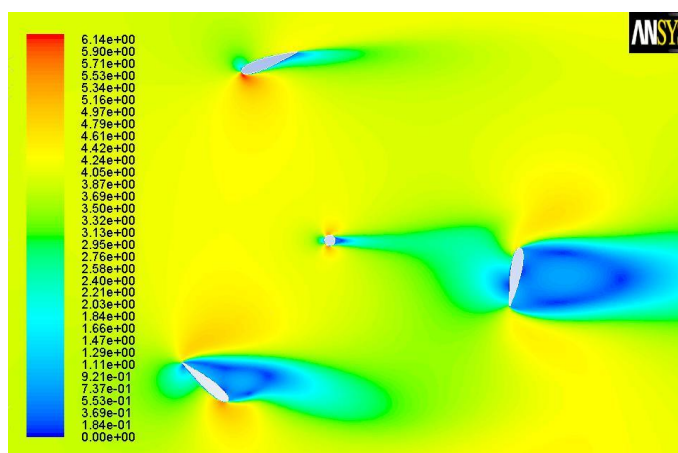


Рис. 4.6. Залежності $C_p(\lambda)$ для ВР з різними σ при швидкості вітру 4 м/с



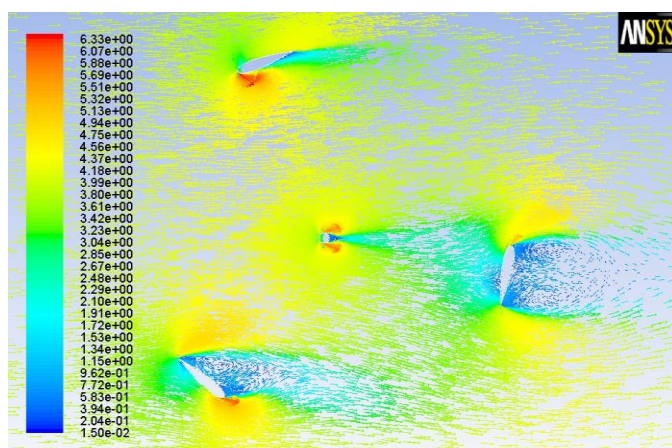
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=2.5000e-01) Nov 09, 2015
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, pbns, rke, transient)

а)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=2.5000e-01) Nov 09, 2015
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, pbns, rke, transient)

б)



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) (Time=2.5000e-01) Nov 09, 2015
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, pbns, rke, transient)

в)

Рис. 4.7. Результати моделювань аеродинамічних процесів роботи ВР з ВВО за швидкості вітру 4 м/с:

а) поле тиску; б) поле швидкості; в) векторне поле швидкості

У даній роботі не проводилися дослідження стартових властивостей ВР в залежності від σ , оскільки було прийнято рішення про використання обґрунтованого вище значення σ , що було отримане в результаті моделювань у динамічному режимі. Проте були проведені серії дослідів у статичному режимі ВР щодо визначення значень його моменту у залежності від азимутального розташування ВР $M_C(\psi)$ при різних швидкостях вітру. Результати моделювань показано на рис. 4.8.

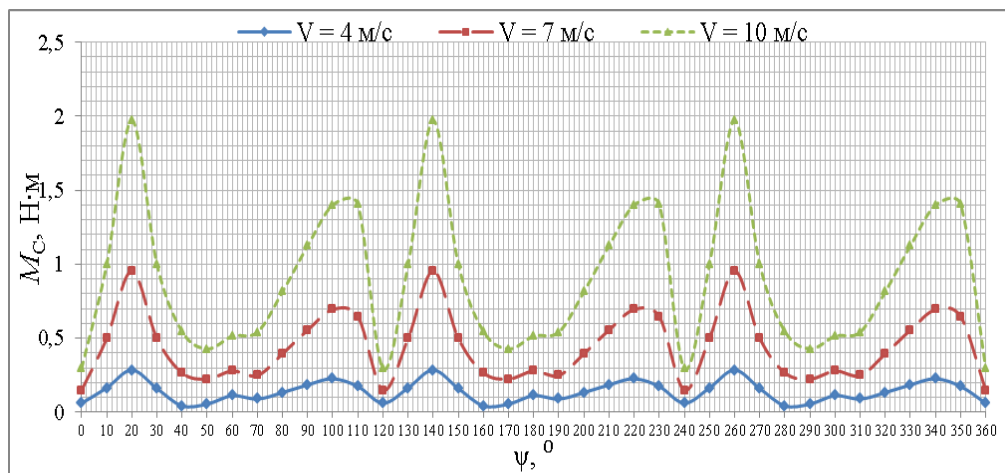


Рис. 4.8. Залежності стартового моменту ВР від його кутового положення при швидкостях вітру 4 м/с, 7 м/с та 10 м/с

Як видно з отриманих результатів, ВР в певних азимутальних розташуваннях ($0^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 120^\circ$ і далі повторюється) має низький стартовий момент M_C , особливо при низьких швидкостях вітру. Це свідчить про те, що є імовірність того, що, перебуваючи в цих азимутальних положеннях, ВР може не розпочати роботу за низьких швидкостей вітру. Тому актуальним є завдання збільшення значень стартового моменту, особливо в цих критичних для старту ВР положеннях. Для цього доцільно так вибрати параметри стаціонарного КВП, щоб він не лише покращував динамічні показники роботи ВР, а й статичні, тобто стартові, особливо на малих швидкостях вітру.

Для дослідження показників роботи вибраного ВР була проведена серія моделювань аеродинамічних процесів у динамічному режимі для трьох швидкостей вітру – 4, 7, 10 м/с, результати яких приведено на рис. 4.9.

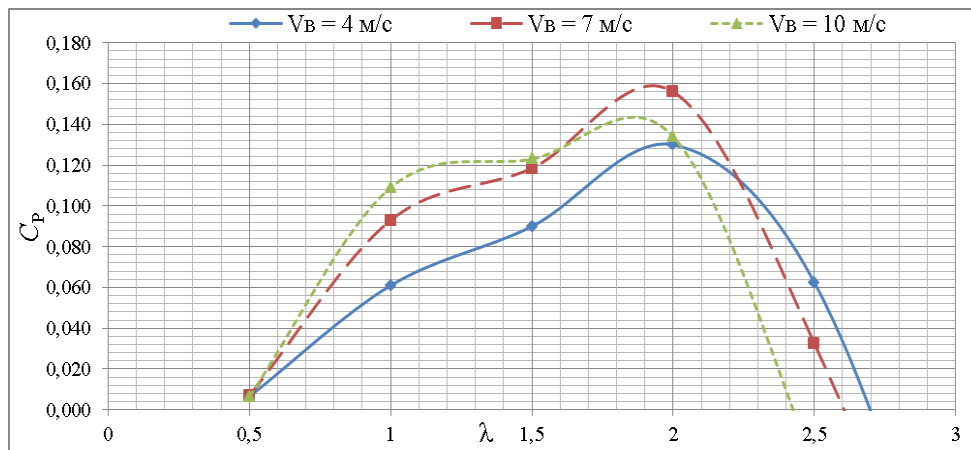


Рис. 4.9. Отримані залежності $C_p(\lambda)$ для дослідного ВР при швидкостях вітру 4 м/с, 7 м/с та 10 м/с

З отриманих залежностей $C_p(\lambda)$ видно, що при збільшенні швидкості вітру з 4 м/с до 7 м/с значення C_{pmax} зростає до 0,160, що позитивно вплине на кількість генерованої ЕЕ, оскільки, відповідно до результатів, показаних на рис. 2.14, на швидкостях вітру 5-6 м/с у м. Львові генерується найбільше ЕЕ в році. З подальшим збільшенням швидкості вітру до 10 м/с значення C_{pmax} дещо знижується. Зі зниженням швидкості ($\lambda < 1,5$) спостерігається деякий підйом характеристик $C_p(\lambda)$, що покращить роботу ВЕУ на низьких швидкостях вітру. Проте за $\lambda = 0,5$ на усіх швидкостях вітру $C_p < 0,01$, що ще раз підкреслює проблему старту таких ВР.

4.1.3. Математичне моделювання статичних і динамічних режимів роботи Н-ротора з КВП та оптимізація параметрів КВП для макетного взірця ВЕУ з ВВО. З метою пошуку ефективної конструкції КВП, який призначений для покращення як робочих, так і стартових характеристик ВР, моделювалася в Solidworks та тестувалася за допомогою CFD робота дослідного ВР з кількома варіантами КВП (рис. 4.10). При цьому проводилися серії математичних моделювань динамічних та статичних режимів роботи.

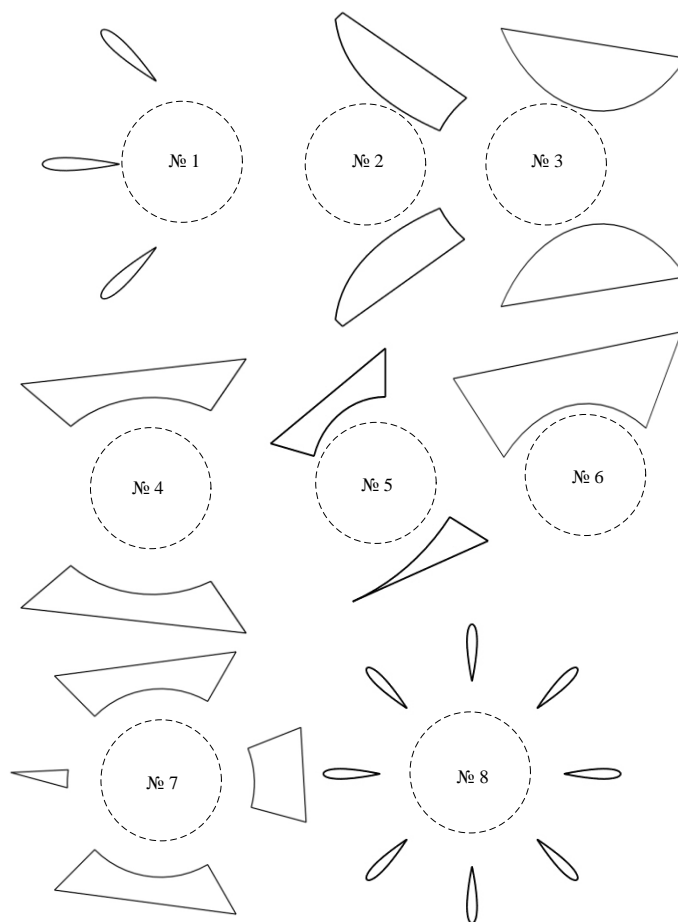


Рис. 4.10. Досліджувані модифікації КВП:
 № 1-7 – поворотні; № 8 – стаціонарний

Спочатку пошук ефективної конструкції КВП був спрямований на поворотні конструкції, які останніми роками фігурували в низці робіт [56, 107, 125, 142]. Для поворотних КВП була проведена ціла низка досліджень у визначенні впливу на ефективність роботи таких чинників: кутів розкриття вхідного та вихідного каналів, форми направляючих вітропотоків, кута розкриття вхідного каналу для вітрового потоку, проміжку між ВР та внутрішнім поверхнею КВП тощо. При цьому акцент ставився на покращення стартових властивостей ВР. Проте, як показали ці дослідження, несиметричні поворотні КВП є ефективними для ВР малої швидкохідності, які працюють, використовуючи переважно силу тиску повітря, наприклад, ВР Sistan, модифікації ВР Савоніуса. Для швидкохідних ВР, що працюють на підйомній силі, як показали подальші дослідження, кращі динамічні показники забезпечують симетричні КВП, які при

тому ж не потребують додаткових вузлів обертання і є дешевшими ніж поворотні. Це зумовлено тим, що максимальне значення підйомної сили пряма відкрита лопать Н-ротора забезпечує в діапазоні значень азимутального кута $50-130^\circ$. Тому симетричний КВП №8 на рис. 4.10 буде спрямовувати вітропотік з більшої площі омивання на лопаті ВР саме під такими кутами, але в ширшому діапазоні азимутальних кутів, практично від 0 до 180° . Тому подальші дослідження проводилися саме з КВП цього типу, правда з плоским профілем 8-х направляючих вітропотіку, що суттєво спрощує конструкцію КВП (рис. 4.11). Також на рис. 4.12 продемонстровано окремі результати моделювань роботи дослідного Н-ротора в поєднанні з КВП на швидкості вітру 10 м/с.

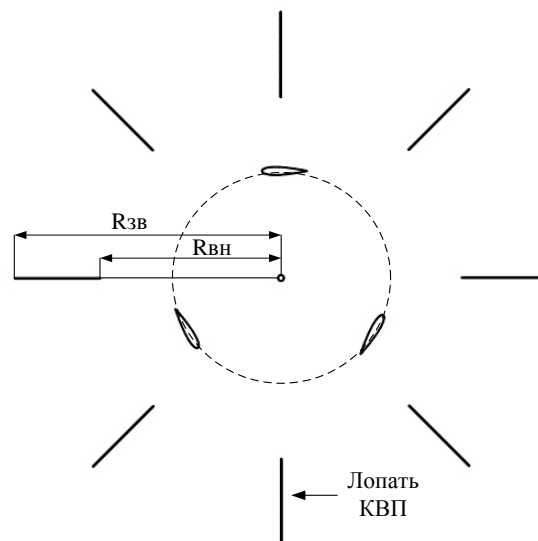
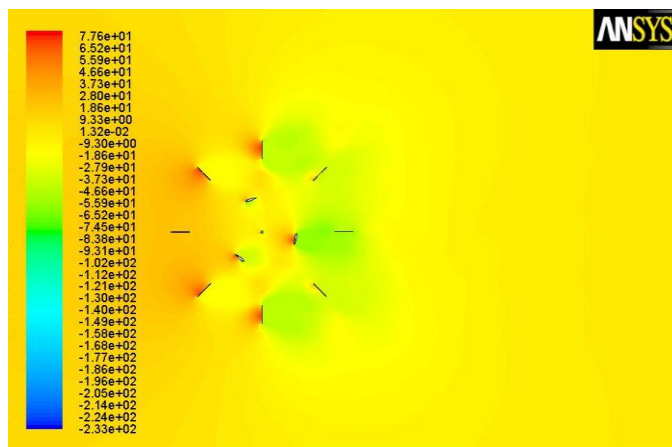


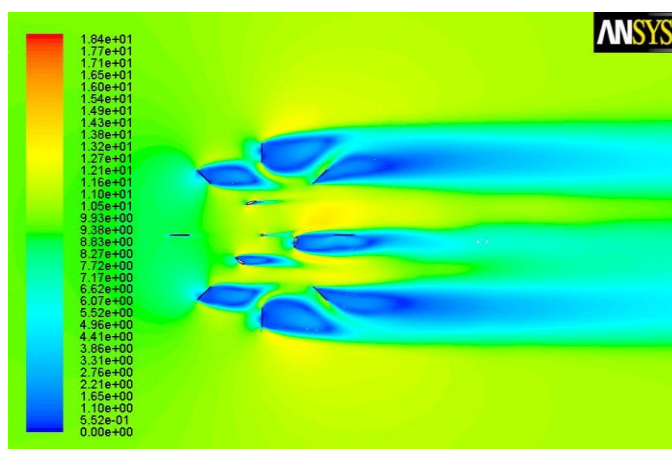
Рис. 4.11. Двовимірне зображення запропонованого КВП з ВР

Оптимізація параметрів КВП зводилась до визначення оптимального відносно ВР розміру КВП та розміру його лопатей. Дослідження проводилися для досліджуваного ВР з радіусом $0,45$ м для трьох різних значень зовнішнього радіуса КВП R_{zv} , відповідно $0,9$, $1,2$ та $1,5$ м. При цьому задавалася низка значень внутрішнього радіуса КВП R_{vn} . Для кожного з варіантів було проведено низку математичних моделювань для визначення залежностей $C_p(\lambda)$, що характеризують динаміку роботи. На рис. 4.13 та 4.14 наведено отримані залежності $C_p(\lambda)$ для ВР з КВП із $R_{zv} = 0,9$ та $1,2$ м відповідно.



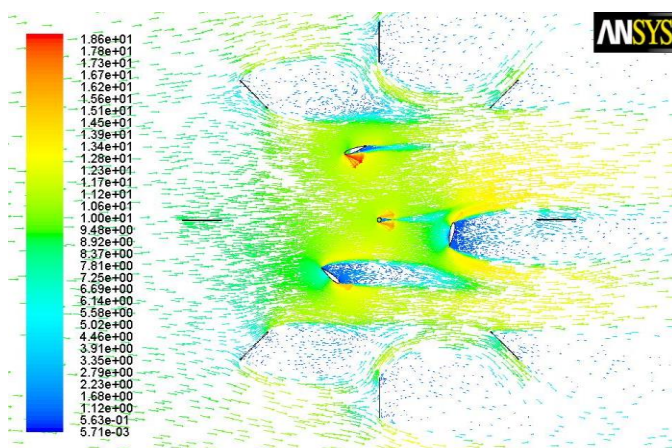
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=2.5000e+00) Nov 09, 2015
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, pbns, rke, transient)

a)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=2.5000e+00) Nov 09, 2015
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, pbns, rke, transient)

б)



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) (Time=2.5000e+00) Nov 09, 2015
ANSYS FLUENT 12.1 (2d, dp, pbns, rke, transient)

в)

Рис. 4.12. Результати моделювань аеродинамічних процесів роботи Н-ротора з КВП іа швидкості вітру 10 м/с:
а) поле тиску; б) поле швидкості; в) векторне поле швидкості

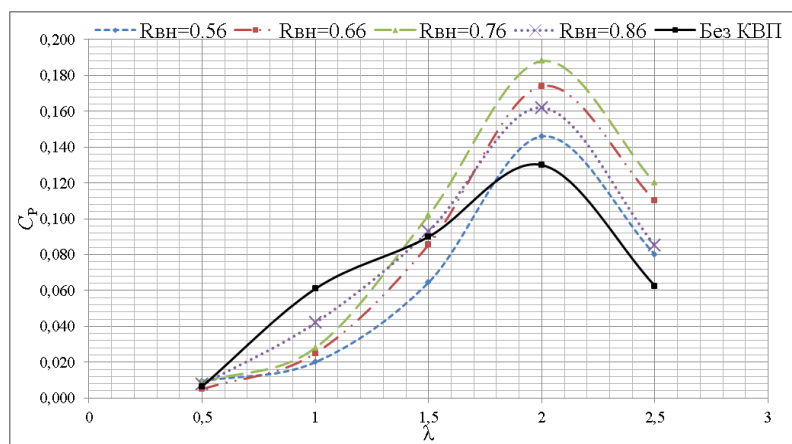


Рис. 4.13. Залежності $C_p(\lambda)$ для ВР з КВП із зовнішнім радіусом $R_{зв} = 0,9$ м та з різними значеннями внутрішнього радіуса $R_{вн}$

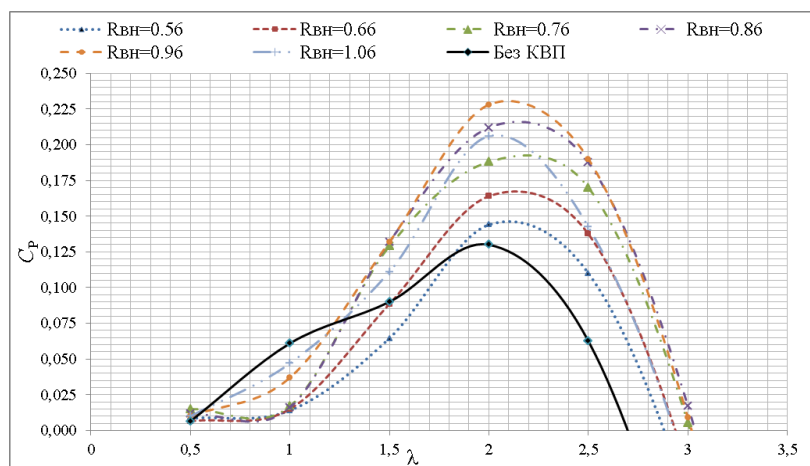


Рис. 4.14. Залежності $C_p(\lambda)$ для ВР з КВП із зовнішнім радіусом $R_{зв} = 1,2$ м та з різними значеннями внутрішнього радіуса $R_{вн}$

Аналізуючи отримані залежності, можна побачити, що оптимальними значеннями $R_{вн}$ для КВП з $R_{зв}$ 0,9 м та 1,2 м є, відповідно, значення, які рівні 0,76 м та 0,96 м (рис. 4.15). Як видно, оптимальним є відношення $R_{зв} / R_{вн}$ на рівні 1,21. Очевидним є той факт, що збільшення розмірів КВП призводить до підвищення C_{pmax} , проте при значному збільшенні відносних розмірів КВП його робота стає щораз менше прогнозованою, а вартість – великою. Тому на основі отриманих результатів досліджень можна стверджувати, що раціональним є відносний розмір КВП в діапазоні $R_{зв} / R = 2-3$. У результаті для подальших досліджень стартових властивостей було вибрано КВП із значенням $R_{зв} = 1,2$ м та оптимальним значенням $R_{вн} = 0,96$ м.

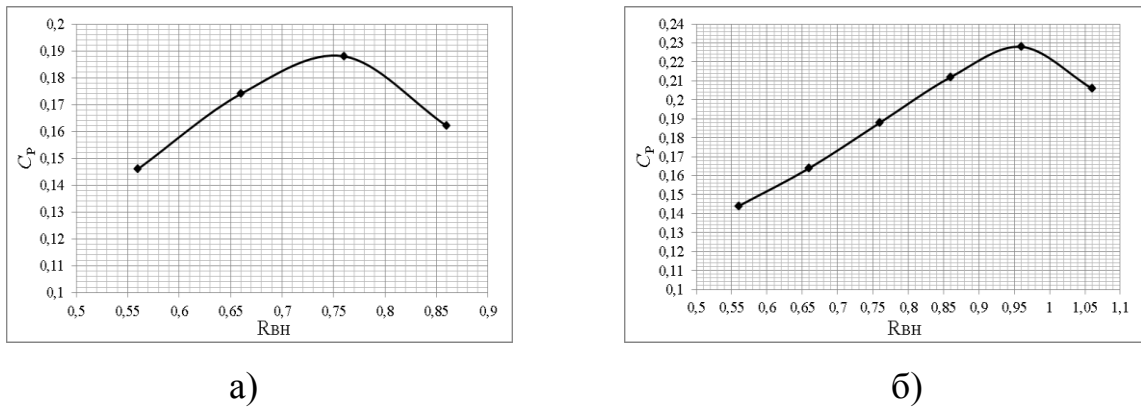
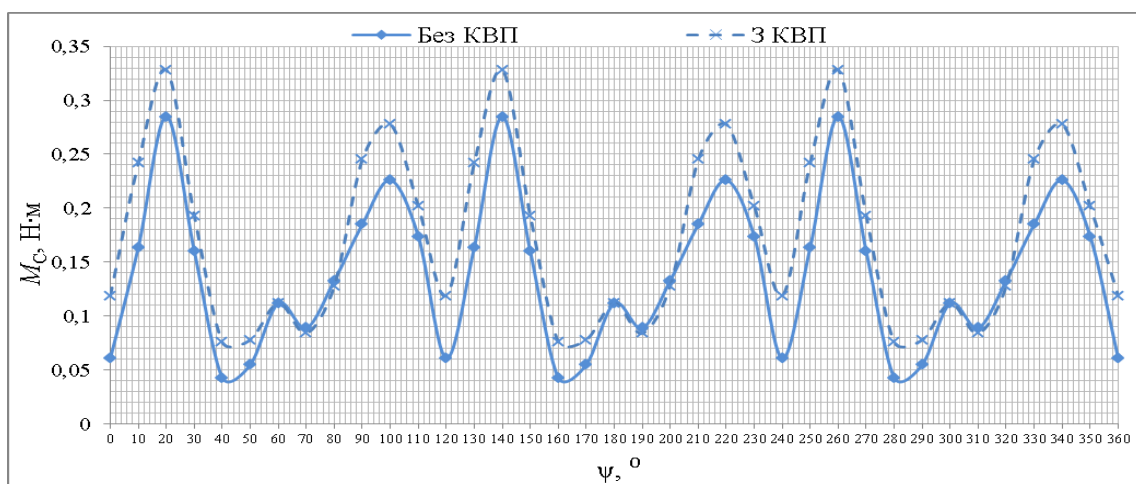


Рис. 4.15. Залежності C_{Pmax} від R_{BH} КВП різних розмірів:

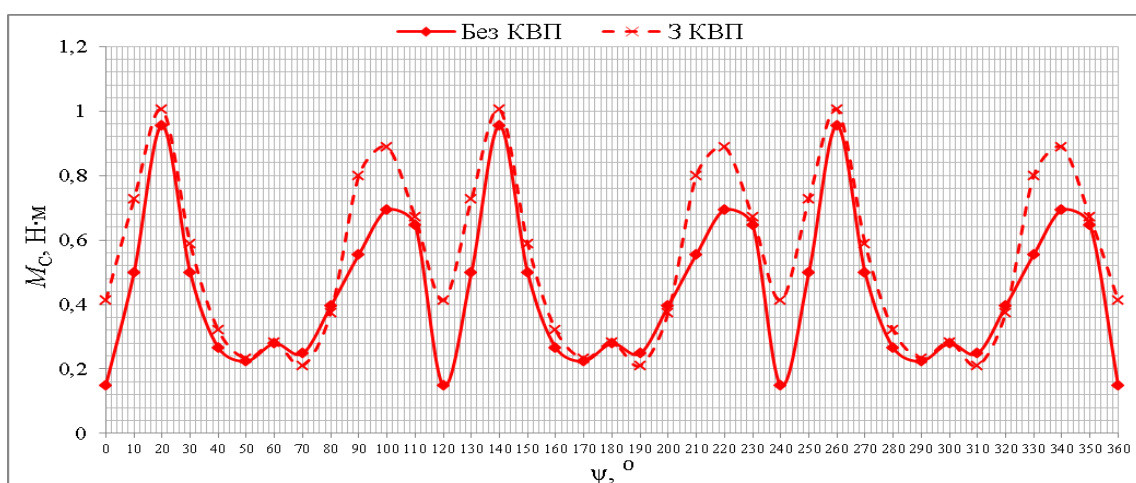
а) з $R_{zB} = 0,9$ м; б) з $R_{zB} = 1,2$ м

Було проведено серію досліджень аеродинамічних процесів у статичному режимі роботи ВР з вибраним КВП з для різних швидкостей вітру – 4, 7 та 10 м/с. Отримані результати (рис. 4.16) показують, що використання КВП дало позитивний ефект – для всіх швидкостей вітру значення стартового моменту відчутно зростають майже в усіх азимутальних положеннях ВР. Проте, найважливіше, що M_C збільшився в критичних точках його локальних мінімумів, що відповідають значенням азимутального кута положення ВР $45-50^\circ$, 70° , 120° (через 120° картина повторюється, бо ВР з трьома лопатями повертається у вихідне положення), особливо на малих швидкостях вітру. Як видно з рис. 4.16 а, за найнижчої із досліджуваних швидкості вітру 4 м/с найменший критичний момент при $\psi = 45^\circ$ зріс з 0,04 до 0,07 Н·м, тобто на 70%. На стільки ж приблизно зріс момент і при $\psi = 120^\circ$, тоді як при $\psi = 70^\circ$ від залишився без зміни. Отож, КВП позитивно впливає на стартові можливості ВР.

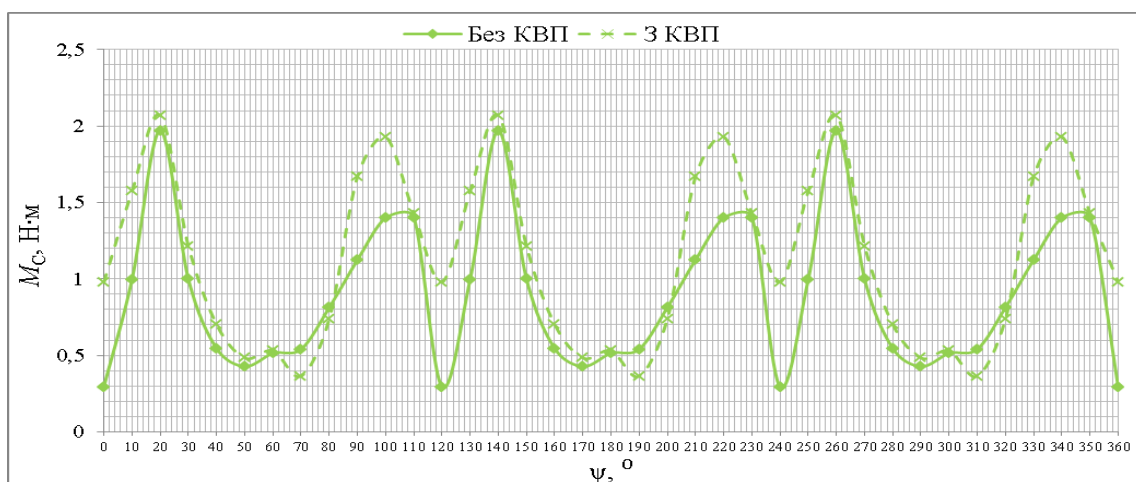
Далі були проведені серії моделювань динамічних режимів роботи ВР з КВП, в результаті яких були отримані залежності $C_p(\lambda)$ (рис. 4.17) при різних швидкостях вітру. У результаті аналізу отриманих залежностей було встановлено, що використання КВП має позитивний ефект для роботи ВР при всіх, вибраних для моделювань, швидкостях вітру – значення C_{Pmax} за оптимальної швидкохідності ВР $\lambda_{opt} = 1,9 - 2,1$ при застосуванні КВП зростає на: 70,2% при $V_B = 4$ м/с, 52,6 % при $V_B = 7$ м/с та 59,7 % при $V_B = 10$ м/с.



а)



б)



в)

Рис. 4.16. Залежності значення стартового моменту M_C від азимутального кута положення ВР ψ для дослідного Н-ротора з симетричним КВП за різних значень швидкості вітру: а) 4 м/с, б) 7 м/с, в) 10 м/с

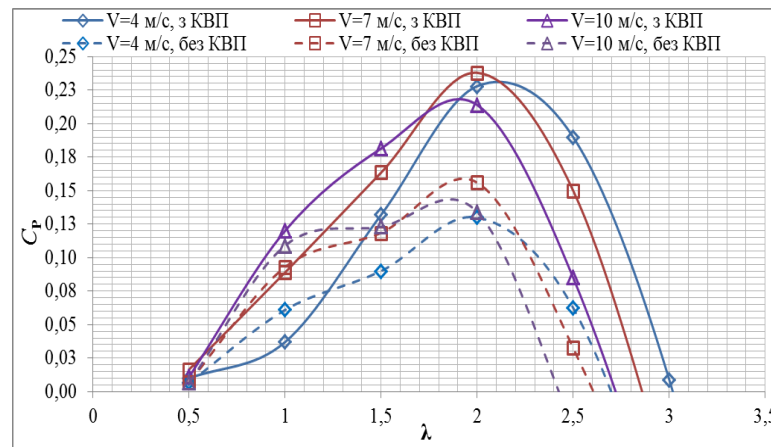


Рис. 4.17. Залежності $C_p(\lambda)$ для дослідного ВР без та з КВП при різних швидкостях вітру

4.1.4. Математичне моделювання аеродинамічних процесів для ВЕУ з ВВО номінальною потужністю 5 кВт. Оскільки практичний інтерес складають ВЕУ з вищими потужностями, ніж досліджувана з метою створення макетного взірця, то для перевірки ефекту від використання запропонованої конструкції КВП було проведено динамічні дослідження роботи на різних швидкостях вітру ВЕУ з номінальною потужністю 5 кВт, яка досягається за $V_B = 10$ м/с. Радіус Н-ротора такої ВЕУ складає $R = 2,0$ м, а висота лопатей $H = 4$ м. Пропорційно до розмірів ВР зросли й оптимальні розміри КВП. Результати проведених досліджень показано на рис. 4.18.

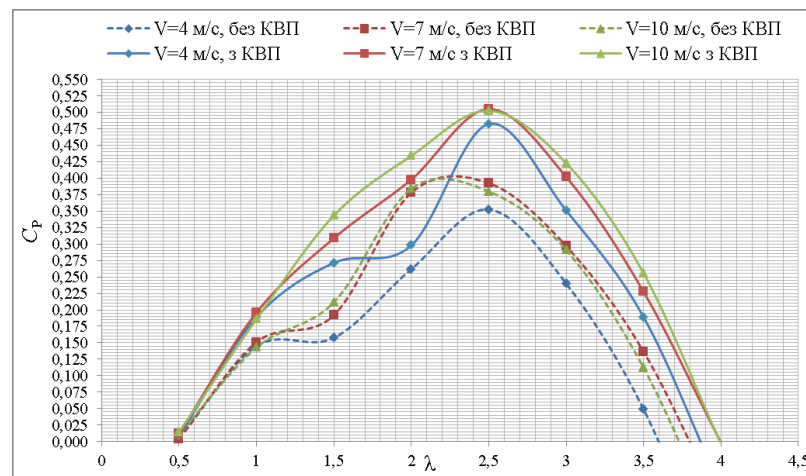


Рис. 4.18. Отримані залежності $C_p(\lambda)$ для ВР та ВР з КВП при різних швидкостях вітру для ВЕУ номінальною потужністю 5 кВт ($R = 2,0$ м)

Як видно з отриманих залежностей, запропонований КВП забезпечує позитивний ефект і на роботу ВР більших розмірів. Цей ефект полягає як і в збільшенні на 37% значення C_{Pmax} при $V_B = 4$ м/с (при $V_B = 7-10$ м/с на 26%), так і у зростанні оптимальної швидкохідності ВР до 2,5 та суттєвому підйомі значень C_P в діапазоні низької швидкохідності $\lambda = 1-1,5$.

4.1.5. Математичне моделювання аеродинамічних процесів для ВР з ВВО в поєднанні з КВП, який переведено в режим захисту. Актуальною залишається проблема забезпечення захисту ВР з ВВО від шквальних вітрів, які хоча рідко, але трапляються на території Львівської області. При появі вітрів великих швидкостей ($V_B > 25$ м/с), треба зупинити роботу ВР з ВВО, оскільки він може зазнати механічних руйнувань. Запропоновану в розділі 1 ідею переведення КВП з режиму концентрації вітрового потоку в режим захисту було перевірено шляхом комп'ютерного моделювання з використанням CFD роботи дослідного ВР з КВП (рис. 4.19) при швидкостях вітру 10 і 20 м/с, а результати продемонстровані на рис. 4.20.

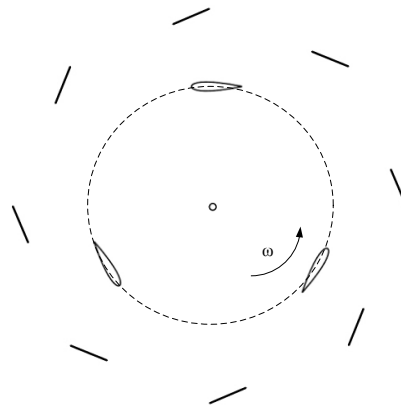


Рис. 4.19. Ескіз досліджуваної ВЕУ з положенням направляючих вітропотіку КВП в режимі захисту від шквальних вітрів

Як видно з рис. 4.20, у випадку переведення КВП в режим захисту значення C_P різко знижується, а характеристика $C_P(\lambda)$ зміщується в зону низьких значень швидкохідності. Отже, можна зробити висновок, що КВП в режимі захисту може забезпечити як захист ВЕУ так і її зупинку при потребі.

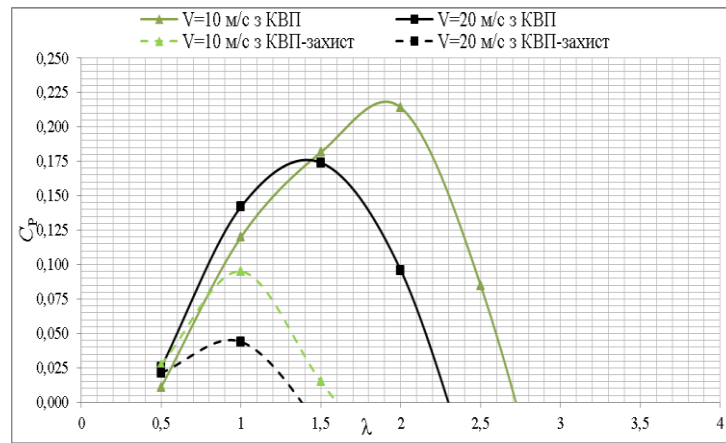


Рис. 4.20. Отримані залежності $C_p(\lambda)$ для ВР з КВП в робочому положенні і для ВР з КВП, що переведений в режим захисту

4.1.6. Створення та експериментальні дослідження макетного взірця ВР з ВВО та КВП. За отриманими результатами комп'ютерного моделювання з використанням CFD було створено експериментальну установку ВЕУ з ВВО запропонованої конструкції (рис. 4.21).

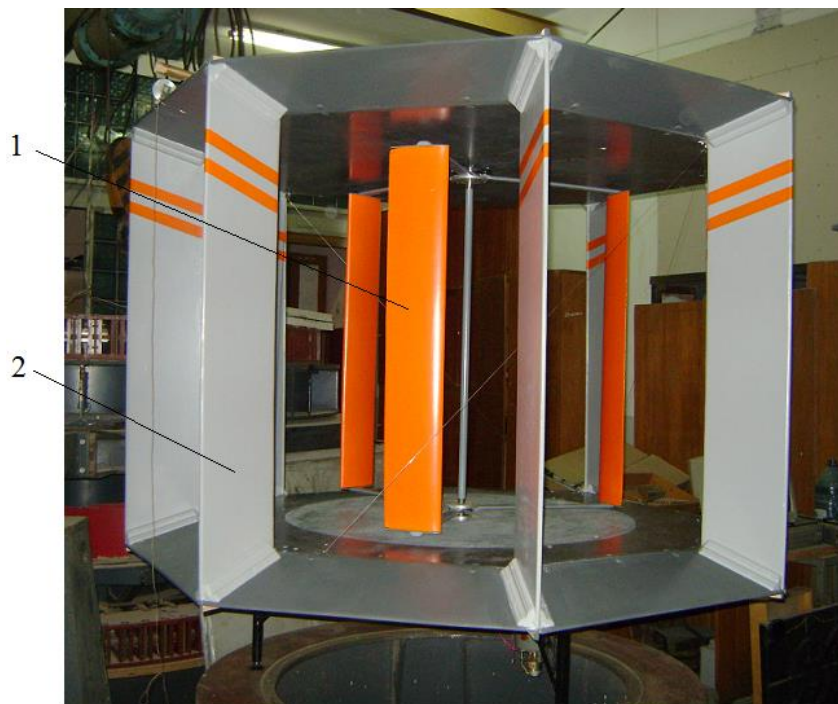


Рис. 4.21. Світлина макетного взірця ВЕУ з ВВО: 1 –Н-ротор; 2 – КВП

З метою оцінки аеродинамічних властивостей створеного макетного взірця ВЕУ з ВВО були проведені експериментальні дослідження в натурних умовах

роботи ВЕУ на реальних вітрах. Для цього була розроблена методика, теоретичне підґрунтя якої полягає в наступному.

Від ВР відмикався генератор, а на валу створювався постійний момент статичного навантаження за допомогою нитки 1, що охоплює шків 2, розміщений на валу 3 ВР. При цьому один кінець нитки закріплювався до зафіксованої пружини 4, а до другого, перекинутого через блок 5, прив'язувався вантаж 6 масою m (рис. 4.22). Оскільки нитка із зафіксованими кінцями під час обертання шківів практично нерухома, то в режимі усталеної кутової швидкості ВР його механічний момент буде рівним моменту створюваного вантажем механічного навантаження на валу ВР. Механічна потужність ВР буде затрачатися на подолання тертя нитки об шків та тертя в опорах ВР. Момент статичного навантаження становитиме

$$M_{\text{н}} = (mg - F_{\text{пр}})r_{\text{ш}}, \quad (4.1)$$

де $F_{\text{пр}}$ – сила розтягу пружини;

$r_{\text{ш}}$ – радіус шківів.

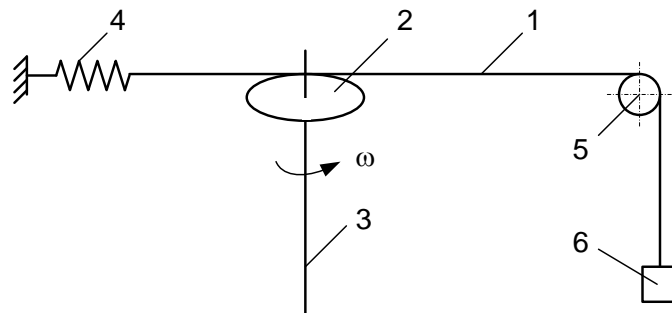


Рис. 4.22. Ескіз механізму створення моменту статичного навантаження на валу ВР в макетному взірці ВЕУ з ВВО

За правильного підбору маси вантажу m для заданого шківів та нитки сила розтягу пружини не перевищує 10% від сили натягу іншого кінця нитки mg , тому в першому наближенні можна припустити, що $F_{\text{пр}} = 0$. Отож, з рівняння (4.1) випливає, що за допомогою такого простого пристрою в досліді створюється

постійний момент статичного навантаження, значення якого можна задавати, змінюючи масу підвішеного вантажу m .

Баланс моментів на валу ВР ВЕУ в довільний момент часу описується таким рівнянням:

$$M_{\text{ВЕУ}} = M_{\text{н}} + M_{\text{с.т}} + b\omega + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.2)$$

де $M_{\text{с.т}}$ – момент сухого тертя у вузлах обертання ВР;

b – коефіцієнт в'язкого тертя в підшипниках;

J_{Σ} – момент інерції ВР.

Підставляючи в рівняння (4.2) вираз для моменту $M_{\text{ВЕУ}}$, що створюється вітровим потоком на валу ВР (1.3), з врахуванням (1.2) отримуємо вираз для знаходження коефіцієнта використання ВР потужності вітру у вигляді

$$C_{\text{P}} = \frac{M_{\text{н}} + M_{\text{с.т}} + b\omega + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}}{0,5\rho_{\text{п}}A} \cdot \frac{\omega}{V_{\text{В}}^3}. \quad (4.3)$$

Аналіз виразу (4.3) стосовно його застосування для дослідження створеного макетного взірця ВЕУ з ВВО дає наступне:

- $M_{\text{с.т}}$ має сталі значення 0,017 Н·м, яке визначене експериментально;
- значенням в'язкого тертя в підшипниках кочення ВР можна знехтувати через його порівняно малі значення ($b = 0$);
- враховуючи невелике отримане експериментально значення $J_{\Sigma} = 0,195 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ в натурних експериментах можна записати достатньо тривалі інтервали роботи ВЕУ з постійною кутовою швидкістю ВР ($d\omega/dt = 0$) за дії вітру з відносно постійною швидкістю.

Звідси випливає, що за здійсненими вдалими записами кутової швидкості ВР та швидкості вітру у інтервалах їх постійності при різних значеннях моменту статичного навантаження (маси вантажу m), можна отримати окремі точки аеродинамічної характеристики ВЕУ (ВР з КВП) за виразами

$$C_P = \frac{M_H + M_{с.т.}}{0,5\rho_{п}A} \cdot \frac{\omega}{V_B^3}; \quad \lambda = R \frac{\omega}{V_B}. \quad (4.4)$$

Запис кутової швидкості ВР здійснювався в імпульсним способом (4 імпульси за оберт) за допомогою безконтактного ємнісного давача (рис. 4.23, а), а запис швидкості вітру – за допомогою чашкового анемометра теж з імпульсним виходом, значення показів якого встановлювалося на підставі показів крильчастого термоанемометра з цифровим індикатором (рис. 4.23, б) і точністю вимірювання швидкості вітру 5%. Запис проводився за допомогою двовходового цифрового осцилографа (рис. 4.24).



а)

б)

Рис. 4.23. Апаратне забезпечення фізичного експерименту:

а) імпульсний давач кутової швидкості ВР, б) чашковий анемометр з електричним виходом та крильчастий термоанемометр

Результати обробки експериментальних даних та розрахунків за виразами (4.4) дали можливість отримати низку точок залежності $C_P(\lambda)$, які нанесено на рис. 4.25 разом із відповідними кривими, отриманими в обчислювальних експериментах та взятими з рис. 4.17.

Як видно з рис. 4.25, отримані на підставі експериментальних досліджень точки характеристики $C_P(\lambda)$ задовільно для такого роду досліджень узгоджуються з результатами комп'ютерного моделювання, що підтверджує достовірність застосованого методу дослідження.

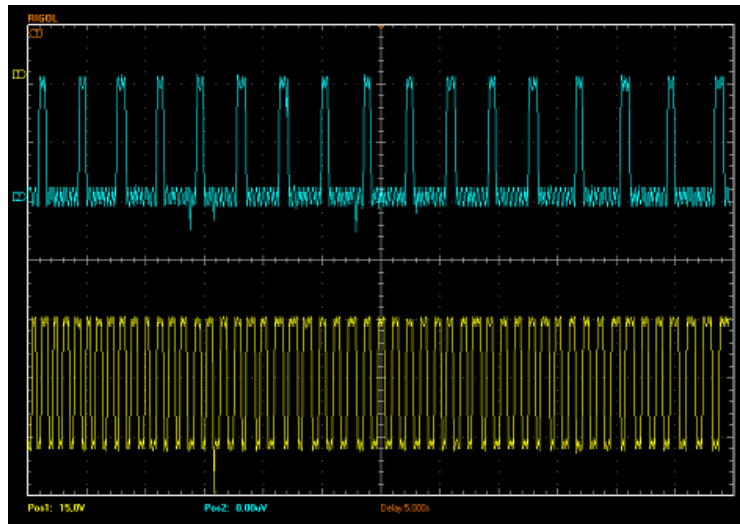


Рис. 4.24. Фрагмент запису цифровим осцилографом імпульсних вихідних сигналів датчик кутової швидкості ВР та датчик швидкості вітру

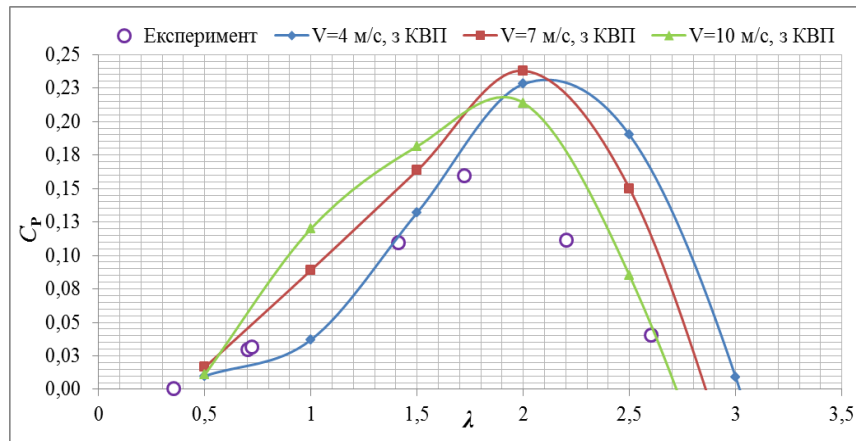


Рис. 4.25. Залежності $C_p(\lambda)$ для макетного візця ВЕУ з ВВО (ВР з КВП) при різних швидкостях вітру, отримані в обчислювальних та фізичних експериментах

4.2. Математичне моделювання і дослідження з метою створення системи автоматичного керування вітросонячною установкою для автономного електрозабезпечення

Основними завданнями даного дослідження є наступні:

- обґрунтування, на основі комп'ютерного симулювання, ефективного для ВЕУ з ВВО способу відбору потужності від СГПМ та регулювання електричного

навантаження;

- обґрунтування, на основі імітаційного моделювання, раціонального для регіону м. Львова способу наведення ФЕП на сонце та знаходження оптимальних значень кутів встановлення стаціонарних та слідкуючих сонячних батарей для застосування у запропонованій вітросонячній установці (рис. 2.15).

4.2.1. Обґрунтування ефективного способу регулювання електричного навантаження СГПМ у ВЕУ з ВВО. Як було описано у підрозділі 1.1.5, використання простішого, в порівнянні з АВН, DC-DC-перетворювача у системі регулювання навантаження СГПМ призводить до збільшення втрат енергії в обмотці якоря генератора. З метою зменшення спотворення струмів генератора, використовують низку заходів: 1) заміна ланки постійної напруги на ланку постійного струму (заміна конденсатора на дросель L) (рис. 4.26, а) [101], 2) використання трьох однофазних випрямлячів зі своїми DC-DC-перетворювачами [115], 3) застосування активних фільтрів лінійних струмів генератора (рис. 4.26, б) [135]. Перший спосіб відзначається простотою, проте він придатний лише для DC-DC-перетворювача підвищувального типу і не дає змоги забезпечити синусоїдальності струмів СГПМ та їх синфазності з ЕРС. Другий спосіб характеризується відносною складністю та підвищеною вартістю, оскільки включає в себе три канали керування. Третій спосіб теж складний, бо має два активні перетворювачі – DC-DC та активний фільтр струму.

Від перелічених способів вигідно відрізняється ще один [68], який топологічно є подібним до показаного на рис. 4.26, а, проте відрізняється від останнього режимом роботи – перервним характером лінійних струмів на вході трифазного діодного моста ДМ (струм фази А i_A на рис. 4.27, а). При цьому середні значення цих струмів (крива $i_{A,ср}$ струму фази А) мають дуже близьку до синусоїди форму. Перервні струми з високою частотою повторюваності формуються в дроселях $L1-L3$ з малою індуктивністю (рис. 4.27, б), а завдяки конденсаторам $C1-C3$ лінійні струми в обмотках якоря СГПМ набувають неперервного близького до синусоїдальної форми характеру.

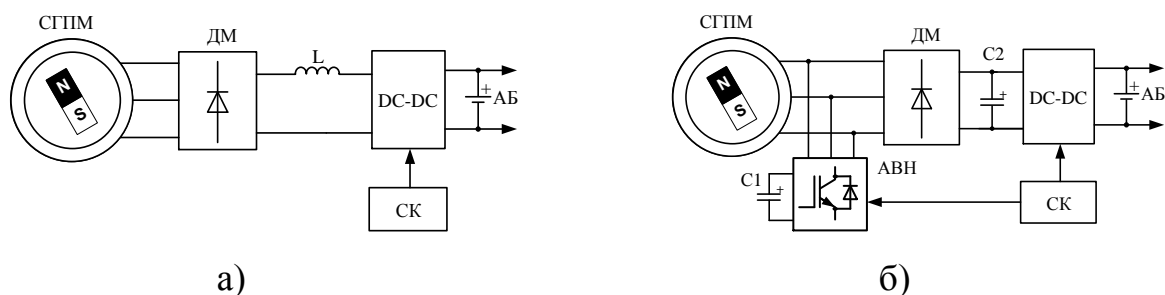


Рис. 4.26. Електронні системи регулювання навантаження СГПМ з низькими спотвореннями струмів якоря генератора: а) з ланкою постійного струму; б) із застосуванням активних струмових фільтрів

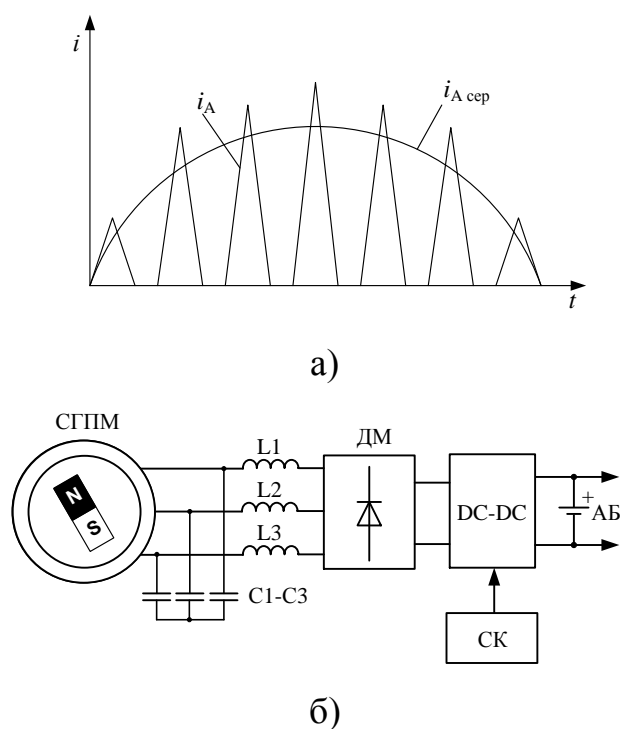


Рис. 4.27. Перервний характер формування лінійних струмів СГПМ (а) та система регулювання навантаження ВЕУ (б), яка його реалізує

З метою обґрунтування ефективного способу регулювання електричного навантаження СГПМ у ВЕУ з ВВО, було проведено порівняльні дослідження пасивних і активних систем шляхом комп'ютерного симулювання в середовищі Matlab/Simulink. Було вибрано три альтернативні системи: пасивна (рис. 1.10, а) з різною кількістю АБ, активна з АВН (рис. 1.10, г) і активна – з DC-DC-перетворювачем та коректором струмів якоря шляхом формування їх перервного характеру (рис. 4.27, б).

Кожна з трьох вказаних систем досліджувалася в усталених режимах роботи ВЕУ з ВВО номінальною вихідною потужністю 1 кВт на постійних швидкостях вітру від 3 до 10 м/с. Розраховані значення параметрів основних елементів такої ВЕУ є наступними.

ВР: трилопатевий Н типу, радіус $R = 1,4$ м, площа омивання $A = 5,258$ м², аеродинамічна характеристика описується наступним виразом коефіцієнта відбору ВР потужності вітру [64]:

$$C_p(\lambda) = 1,14 \cdot \left(\frac{9,47}{\lambda} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{6}{\lambda}}. \quad (4.5)$$

СГПМ: номінальна потужність $P_r = 1000$ Вт, номінальна кутова швидкість $\omega = 27$ рад/с, кількість пар полюсів $p = 20$, амплітуда потокозчеплення обмотки якоря з парою полюсів магнітів $\Phi = 0,13$ Вб, активний опір та індуктивність фазної обмотки якоря відповідно $R_{ак} = 0,35$ Ом і $L = 4$ мГн.

Механічна частина ВЕУ: сумарний момент інерції ВР разом з ротором генератора $J = 19$ кг·м², момент сухого тертя $M_c = 2$ Н·м.

АБ: У ланці постійного струму використано АБ напругою 12 В кожна, з'єднані послідовно. Для штатної роботи АВН необхідно навантажити на 8 АБ, DC-DC-перетворювач підвищувального типу достатньо навантажити на 7 АБ. Пасивна система досліджувалася з кількістю АБ 4, 5 і 6.

Загальна комп'ютерна модель електромеханічної системи ВЕУ (рис. 4.28) складається з наступних підсистем: ВР (Wind Turbine Subsystem), СГПМ (Permanant Magnet Synchronous Machine), вимірювання електричних змінних потоку генерованої енергії (Measurement Subsystem), електричного навантаження генератора (Electric Load Subsystem), вимірювання електромагнітної активної потужності СГПМ (Pe_G Subsystem).

Швидкість вітру задається у блоці V_w . Механічний момент $T_{turbine}$, що виробляється ВР, після віднімання від нього моменту тертя в опорах ВЕУ $M_{c,t}$ подається як рушійний на вхід T_m підсистеми СГПМ, яка моделюється стандартним блоком із пакету Simulink. Трифазна вихідна напруга СГПМ через

підсистему вимірювання електричних змінних потоку генерованої енергії, підключена до підсистеми електричного навантаження генератора, у якій моделювалися різні типи систем. У моделі передбачено вимірювання активних потужностей всіх важливих потоків енергії та відповідних ККД: СГПМ у блоці η_G , силового напівпровідникового перетворювача у блоці η_{PC} та сумарного електромеханічної системи у блоці η_{sum} .

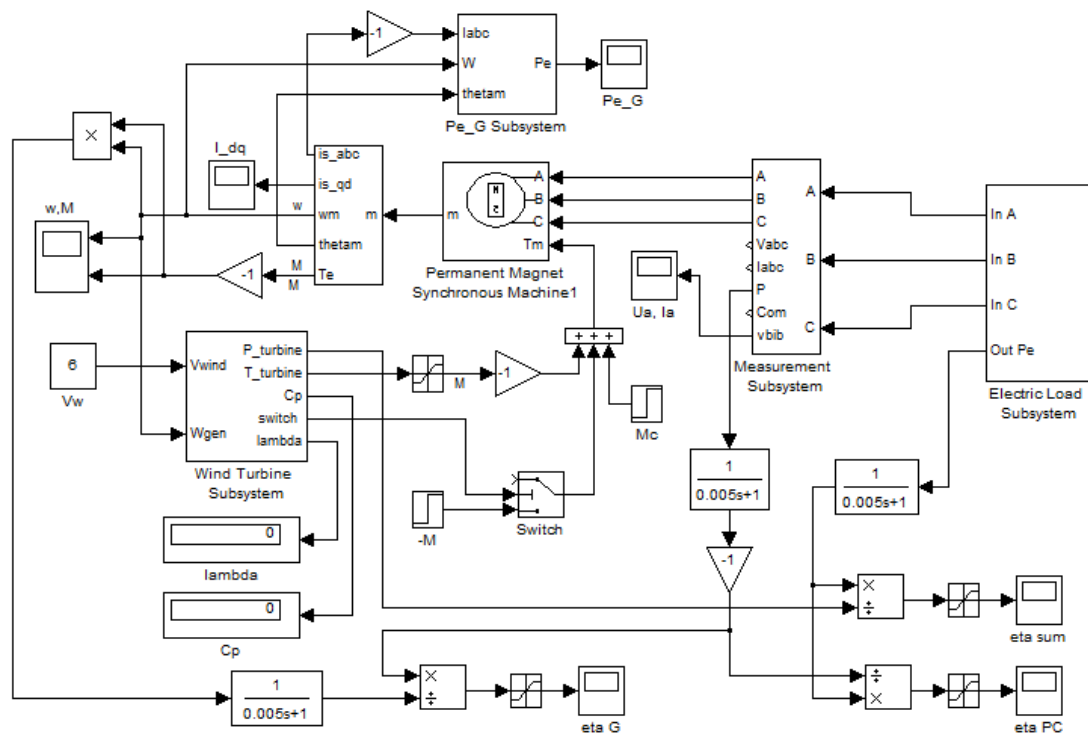


Рис. 4.28. Загальна комп'ютерна модель електромеханічної системи ВЕУ

У підсистемі Pe_G Subsystem (рис. 4.29) здійснюється обчислення електромагнітної активної потужності СГПМ на підставі вимірних значень кутової швидкості генератора w , механічного кута положення його ротора $thetam$, а також миттєвих значень лінійних струмів якоря $Iabc$. У блоках координатних перетворень Парка $Park$ Subsystem і Кларка $Clarke$ Subsystem здійснюється перетворення проєкцій значення ЕРС генератора з обертових з ротором координат $d-q$ до фазних координат abc . У підсистемі Dot product Subsystem обчислюється активна електромагнітна потужність як скалярний добуток між векторами струму якоря та ЕРС генератора, заданими у фазних координатах.

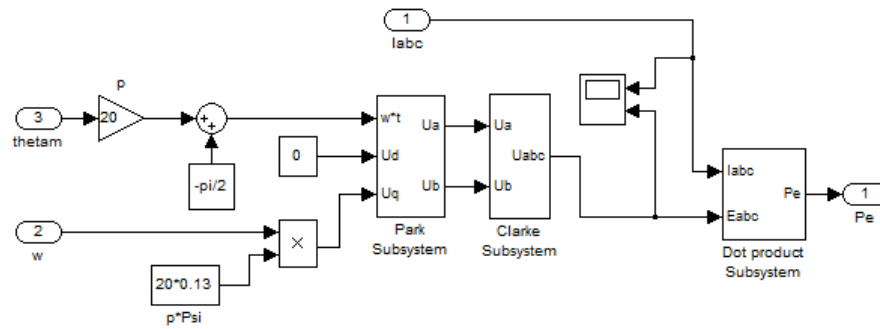


Рис. 4.29. Комп'ютерна модель підсистеми вимірювання електромагнітної активної потужності СГПМ (Pe_G Subsystem)

Підсистема ВР (рис. 4.30) побудована за рівняннями (1.1) та (1.3). У підсистемі $C_p(\lambda)$ математично описана функція (4.5), яка задає криву $C_p(\lambda)$. На виході підсистеми отримуємо значення моменту $T_{turbine}$, потужності $P_{turbine}$, C_p та швидкості λ ВР. Тригер S-R Flip-Flop призначений для отримання одиничного логічного сигналу switch після досягнення ВР значення швидкості, рівного оптимальному значенню λ_{opt} . Цей сигнал відімкне ключем Switch від генератора великий момент – M (рис. 4.30), призначений для швидшого набуття ВЕУ оптимальної кутової швидкості.

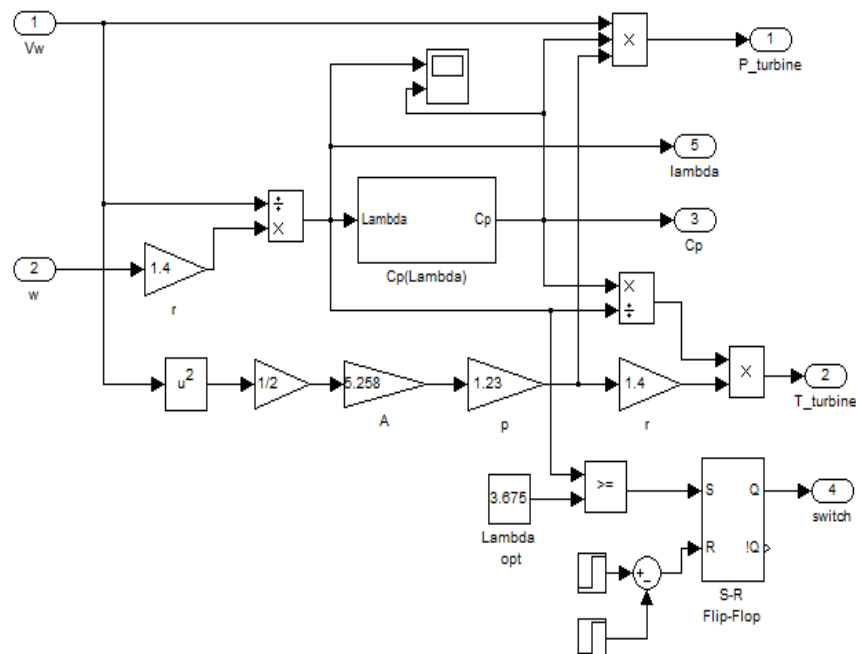


Рис. 4.30. Комп'ютерна модель підсистеми ВР (Wind Turbine Subsystem)

На рис. 4.31 представлено комп'ютерна модель підсистеми електричного навантаження генератора (Electric Load Subsystem) у випадку пасивного навантаження СГПМ. Випрямлена діодним мостом Diode Bridge трифазна напруга, що отримується від генератора, безпосередньо прикладається до акумуляторної батареї АВ, змодельованої джерелом постійної напруги і додатковими внутрішнім опором та індуктивністю.

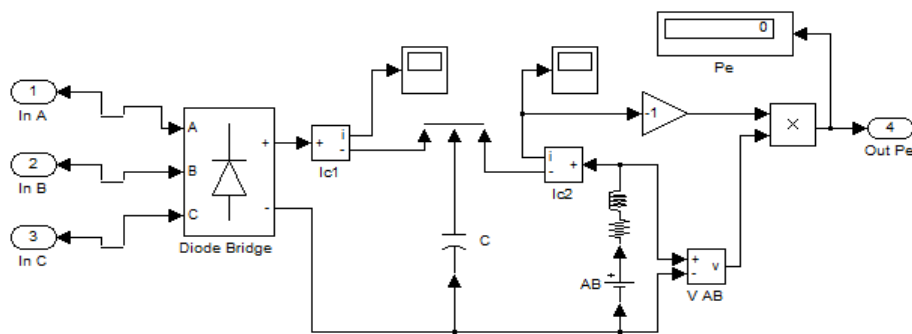


Рис. 4.31. Комп'ютерна модель підсистеми пасивного навантаження СГПМ

У випадку активної системи електричного навантаження СГПМ, реалізованої за допомогою DC-DC-перетворювача (рис. 4.32), останній реалізовано на IGBT-транзисторі та діоді Diode. Керування транзистором здійснює система Control Sybsystem (рис. 4.33), у якій здійснюється автоматичне регулювання за відхиленням кутової швидкості ω_p від оптимального значення, отриманого на підставі вимірювання значення швидкості вітру V_w . Вихідна напруга ПІ-регулятора швидкості Speed Controller порівнюється в компараторі Comparator з пилкоподібною опорною напругою, отриманою від генератора трикутної напруги Subsystem Triangular generator. Вихідна ШІМ напруга через ключ Switch, що вмикається зовнішнім сигналом In_t , подається на затвор IGBT-транзистора.

Для забезпечення близької до синусоїдальної форми струмів якоря СГПМ між останнім та діодним мостом ввімкнено підсистему з трифазним фільтром Filtr Sybsystem (рис. 4.34).

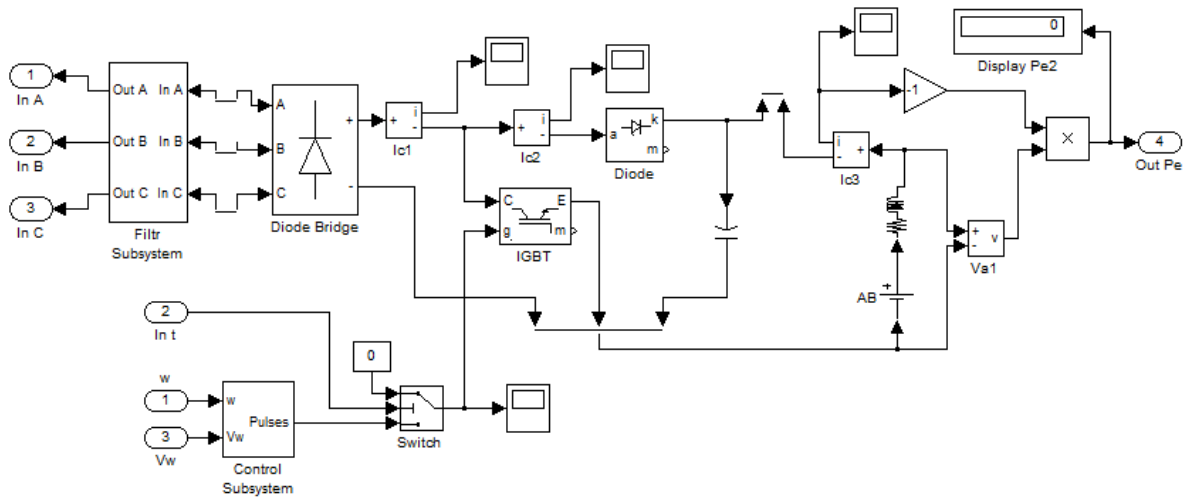


Рис. 4.32. Комп'ютерна модель підсистеми активного навантаження СГПМ за допомогою DC-DC-перетворювача

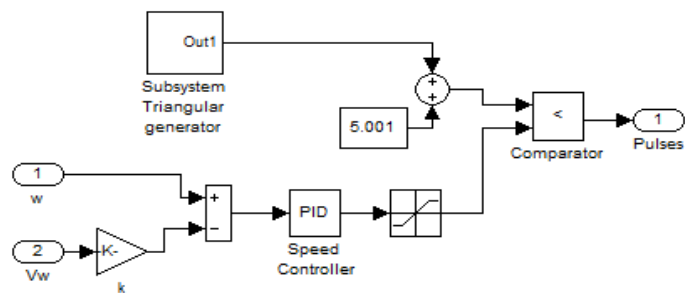
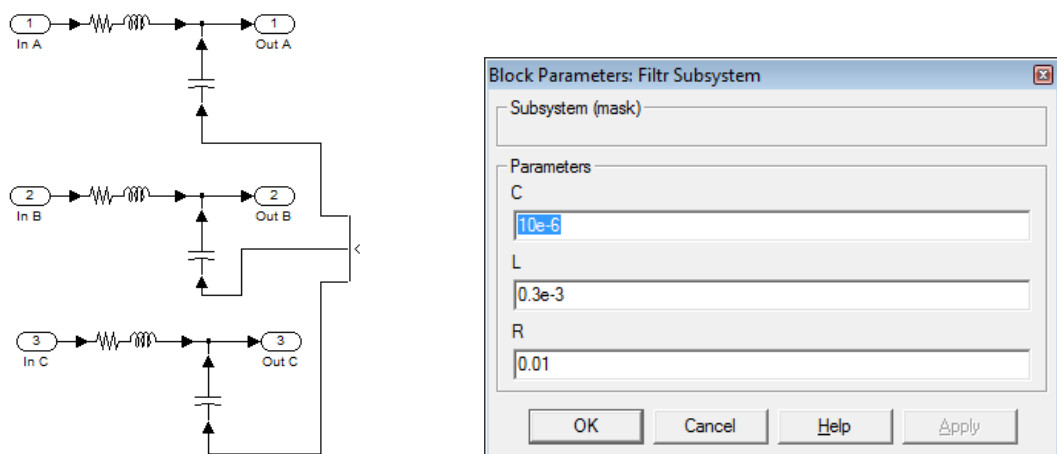


Рис. 4.33. Комп'ютерна модель підсистеми автоматичного керування DC-DC-перетворювачем (Control Subsystem)



а)

б)

Рис. 4.34. Комп'ютерна модель (а) та маска із заданими параметрами (б) підсистеми фільтра Filtr Subsystem (рис. 4.32)

У випадку активної системи електричного навантаження СГПМ, реалізованої за допомогою АВН (рис. 4.35), останній реалізовано на мостовому транзисторному інверторі напруги IGBT Inverter, який керується підсистемою векторного керування Vector Control (рис. 4.36).

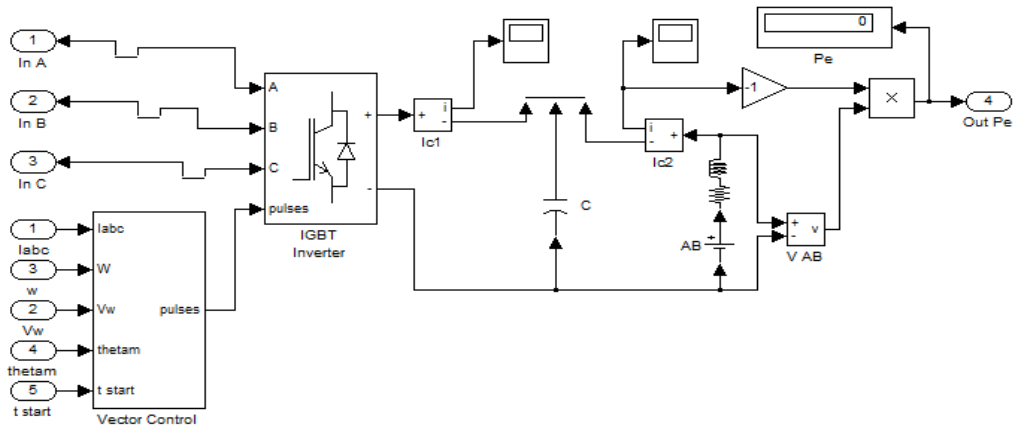


Рис. 4.35. Комп'ютерна модель підсистеми активного навантаження СГПМ за допомогою АВН

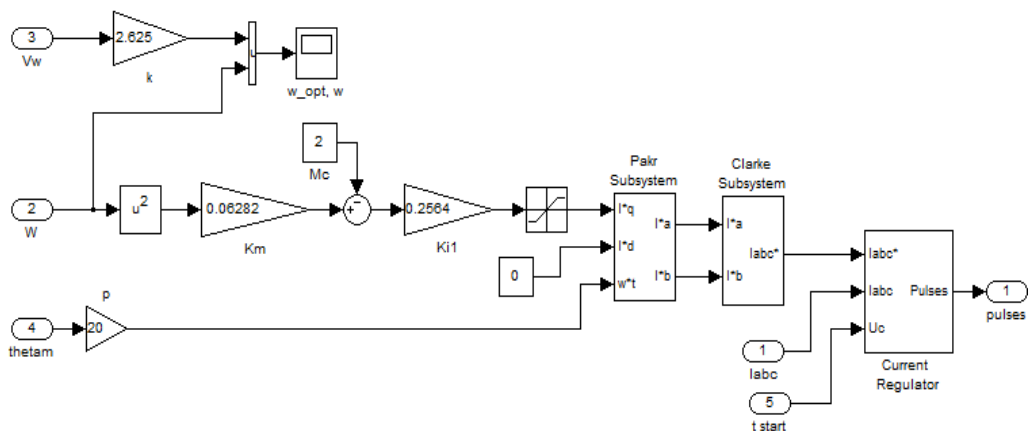


Рис. 4.36. Комп'ютерна модель підсистеми векторного керування навантаженням СГПМ за допомогою АВН (Vector Control)

Автоматичне регулювання оптимального навантаження СГПМ здійснюється бездавачевою (без давача вітру) системою регулювання, що працює за збуренням швидкості вітру [133]. Для цього вимірюється кутова швидкість ВР з генератором (прямо або обчислюється через частоту напруги генератора) і

визначається оптимальне для цієї швидкості значення механічного моменту навантаження ВР за виразом

$$M = K_M \omega^2, \quad (4.6)$$

$$\text{де } K_M = \frac{0,5 \rho_{\Pi} R^3 A C_{P \max}}{\lambda_{\text{opt}}^3}.$$

Якщо навантажувати ВР за допомогою СГПМ моментом, обчисленим за виразом (4.6), то кутова швидкість ВР завжди асимптотично прямуватиме до оптимальної, що відповідає реальній швидкості вітру V_B :

$$\omega_{\text{opt}} = \frac{\lambda_{\text{opt}}}{R} V_B. \quad (4.7)$$

Значення реальної та оптимальної кутових швидкостей ВР порівнюються між собою на осцилографі ω_{opt} , ω (рис. 4.36).

Після віднімання від отриманого за виразом (4.6) значення оптимального моменту навантаження ВР значення реального моменту тертя M_c знаходиться відповідна амплітуда вектора струму навантаження якоря генератора. З метою забезпечення $\cos \varphi = 1$, вектор струму якоря повинен бути спрямованим вздовж осі q в обертовій системі координат. Тому необхідно забезпечити наступні завдання на проекції струму якоря:

$$I_d^* = 0, \quad I_q^* = \frac{2(M - M_c)}{3p\Phi_{\Pi}}. \quad (4.8)$$

Після зворотних координатних перетворень Парка і Кларка формуються відповідні завдання на фазні струми I_{abc}^* , які поступають на трифазний регулятор струму Current Regulator (рис. 4.37). В останньому реалізовано три фазні системи регулювання струмів якоря з гістерезисними регуляторами струмів Relay CR1, Relay CR2 і Relay CR3 (струмові коридори). Вихідні прямі та інверсні сигнали з регуляторів струму із забезпеченням «мертвої» зони керують транзисторами відповідного плеча інвертора напруги. За допомогою ключів

Switch – Switch5 одиничним логічним сигналом U_c система керування інвертором вмикається в роботу.

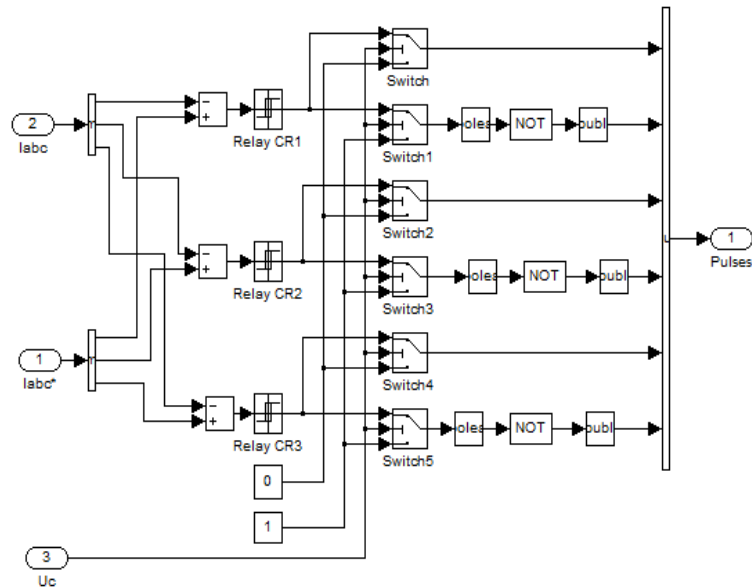


Рис. 4.37. Комп'ютерна модель підсистеми регулювання струмів якоря СГПМ (Current Regulator)

Результати комп'ютерного дослідження представлено на рис. 4.38 - 4.42.

Як видно з рис. 4.38, обидві активні системи, з АВН та DC-DC-перетворювачем, завдяки оптимальному регулюванню навантаження СГПМ забезпечують відбір від вітру при будь-якій його швидкості максимальної потужності.

Пасивна система може задовільно працювати лише з 4-5-а АБ і то починаючи лише з швидкості вітру 4 м/с, а з 6-а АБ – починаючи з швидкості вітру 5 м/с. За 4-х АБ максимальний відбір потужності вітру буде спостерігатися при його швидкості 5 м/с, а за 5-и АБ – при 6,5 м/с. На великих швидкостях вітру ефективність роботи пасивної ВЕУ знижується.

Проте значення коефіцієнта відбору потужності від вітру C_p не є достатнім показником ефективності роботи ВЕУ, оскільки за різних її конфігурацій спостерігається різні значення ККД електромеханічної системи, який обчислюється за виразом

$$\eta_{EM} = \eta_m \eta_\Gamma \eta_{ПЕР}, \quad (4.9)$$

де η_m , η_G , $\eta_{\text{ПЕР}}$ – відповідно ККД механічної системи ВЕУ, СГПМ та силового перетворювача.

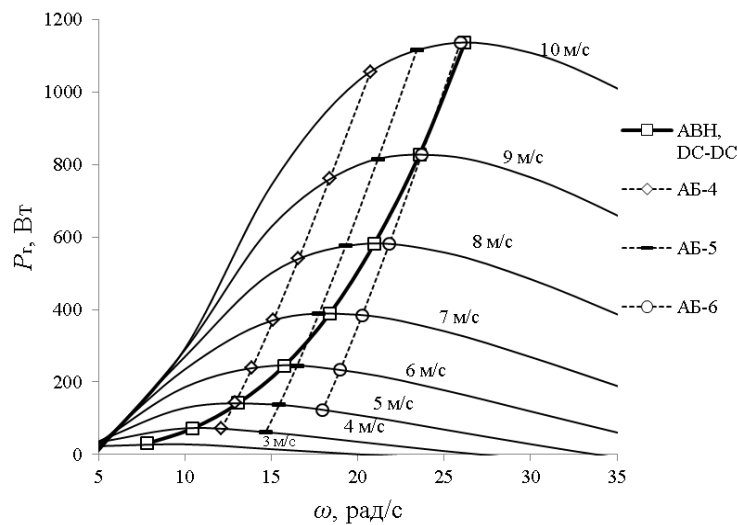


Рис. 4.38. Залежності механічної потужності на валу ВР від його кутової швидкості за різних швидкостей вітру для порівнюваних способів регулювання електричного навантаження СГПМ

Залежність сумарного ККД ВЕУ як відношення вихідної електричної потужності до потужності потоку вітру, що омиває ВР, обчислено за виразом

$$\eta_{\Sigma} = C_P(\lambda)\eta_{EM} \quad (4.10)$$

і представлено для усіх досліджуваних систем ВЕУ на рис. 4.39.

Як видно з отриманих результатів, відмінності в характері залежностей $\eta_{\Sigma}(V_B)$ для досліджуваних систем зумовлені різницею в ККД генератора η_G (рис. 4.40) і силового перетворювача $\eta_{\text{ПЕР}}$ (рис. 4.41), оскільки залежності ККД механічної частини η_m практично однакові. АВН має суттєві переваги при великих потужностях (швидкостях вітру), а при малих ККД генератора і силового перетворювача знижуються через збільшення відносного впливу ШПМ. У той же час, відповідні ККД при застосуванні DC-DC-перетворювача є вищими, ніж при АВН, на малих потужностях, а на великих нижчими. У пасивній системі ВЕУ ККД силового перетворювача є завжди високим, а ККД СГПМ є високим лише

при малих потужностях, а при великих стрімко падає через спотворення струмів. Лише за 6-и АБ ККД генератора завжди перевищує відповідний ККД в системі з DC-DC-перетворювачем.

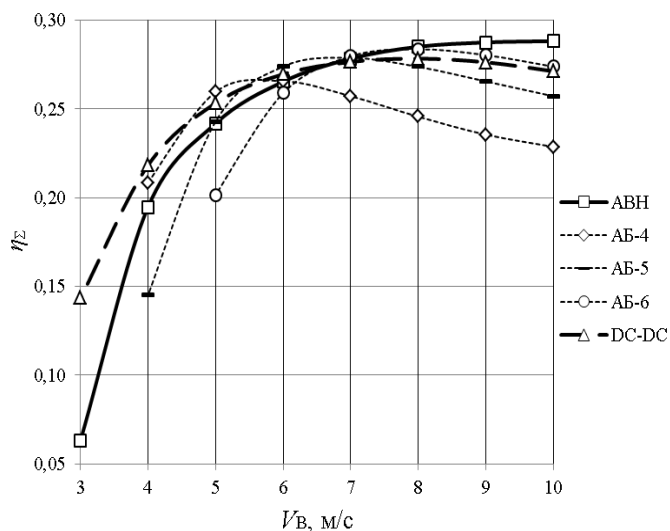


Рис. 4.39. Залежності сумарного ККД ВЕУ від швидкості вітру для порівнюваних способів регулювання електричного навантаження СГПМ

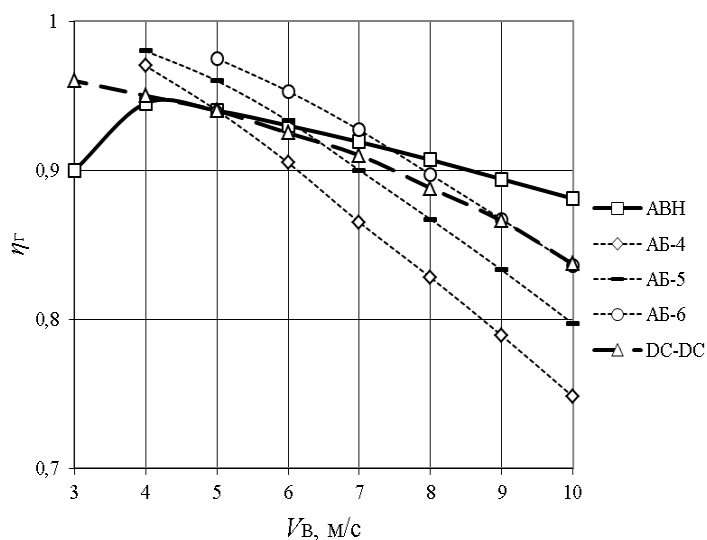


Рис. 4.40. Залежності ККД СГПМ від швидкості вітру для порівнюваних способів регулювання електричного навантаження СГПМ

Аналіз отриманих результатів дав змогу запропонувати використання комбінованого способу керування навантаженням ВЕУ, коли на низьких і середніх швидкостях вітру регулювання відбувається за допомогою DC-DC-

перетворювача, а на високих – пасивним способом. Для досліджуваної ВЕУ з ВВО для цього найкраще вибрати 6 АБ, а перехід з активного на пасивне керування здійснювати за швидкості вітру 7 м/с. При вищих за цю межу швидкостях вітру ЕРС генератора стає достатньою, щоб заряджати АБ напряму через діодний міст на діод DC-DC-перетворювача (рис. 1.10, в). При цьому на малих вітрах отримуємо на виході ВЕУ більшу електричну потужність, ніж при використанні АВН (рис. 4.42, а), а на великих – на 9% більшу, ніж з використанням DC-DC-перетворювача, і всього на 7% меншу, ніж з АВН (рис. 4.42, б). Це дає змогу значно знизити встановлену потужність DC-DC-перетворювача (35% від номінальної потужності генератора), що суттєво відіб'ється на сумарній вартості ВЕУ.

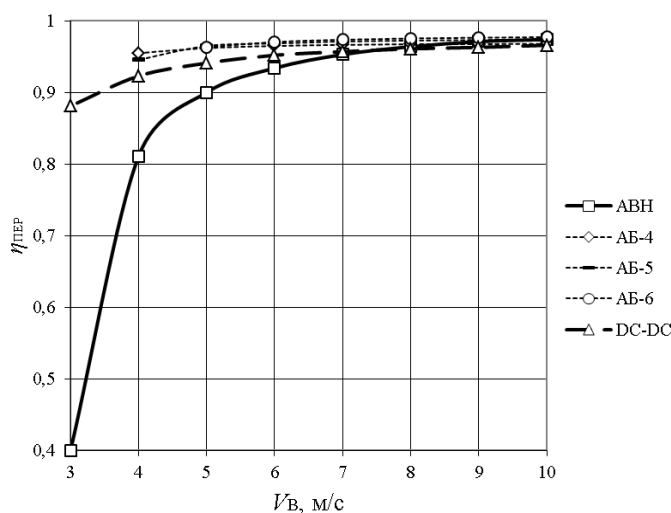


Рис. 4.41. Залежності ККД силового напівпровідникового перетворювача від швидкості вітру для порівнюваних способів регулювання електричного навантаження СГПМ

На рис. 4.43 і рис. 4.44 представлено отримані в ході комп'ютерного симулювання осцилограми ЕРС та струму в одній фазі СГПМ в усталеному режимі роботи ВЕУ на постійних швидкостях вітру відповідно 5 і 9 м/с.

Для можливості генерування електроенергії при швидкості вітру 5 м/с в пасивній системі необхідно було знизити кількість АБ до 4 (рис. 4.43, а). При цьому видно значні спотворення струму та споживання реактивної потужності,

що призводить до втрат енергії в обмотках якоря генератора. В активній системі навантаження з DC-DC-перетворювачем (рис. 4.43, б) ситуація дещо покращується. В активній системі з АВН (рис. 4.43, г) завдяки векторному керуванню струмами якоря практично відсутнє споживання реактивної потужності, проте мають місце відчутні пульсації струму з високою частотою, пов'язані з порівняно великим для малого струму якоря за цієї швидкості вітру струмовим коридором. Найкращі результати отримано в системі з DC-DC-перетворювачем та коректором струмів якоря (рис. 4.43, в): мінімальне спотворення струму та практично одиничний $\cos\varphi$.

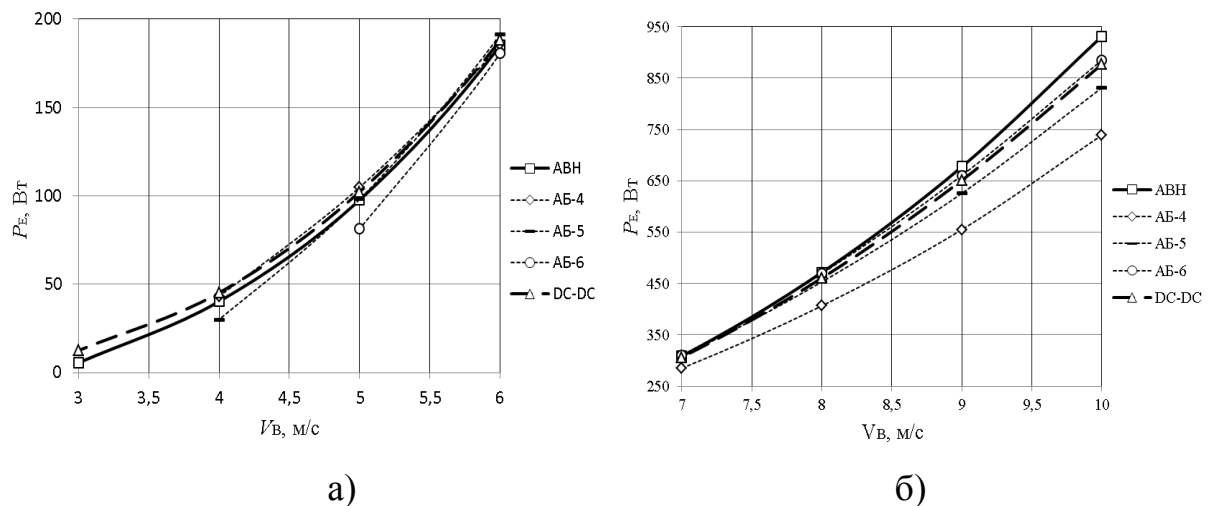


Рис. 4.42. Залежності електричної потужності на виході ВЕУ від швидкості вітру на малих (а) і великих (б) вітрах для порівнюваних способів регулювання електричного навантаження СГПМ

Зі збільшенням потужності генерування за швидкості вітру 9 м/с генерування електроенергії у пасивній системі вже можливе для 6 АВ (рис. 4.44, а). Системі властиве незначне спотворення струму та споживання реактивної енергії. Аналогічний результат отримано й в активній системі з DC-DC-перетворювачем та коректором (рис. 4.44, в), оскільки за такої швидкості вітру ця система переходить у пасивний режим роботи. Подібні результати отримано й для системи з DC-DC-перетворювачем, яка далі працює в активному режимі (рис. 4.44, б), що вказує на недоцільність її застосування на великих потужностях. Найкращі результати в цьому випадку отримано для системи з АВН (рис. 4.44, г).

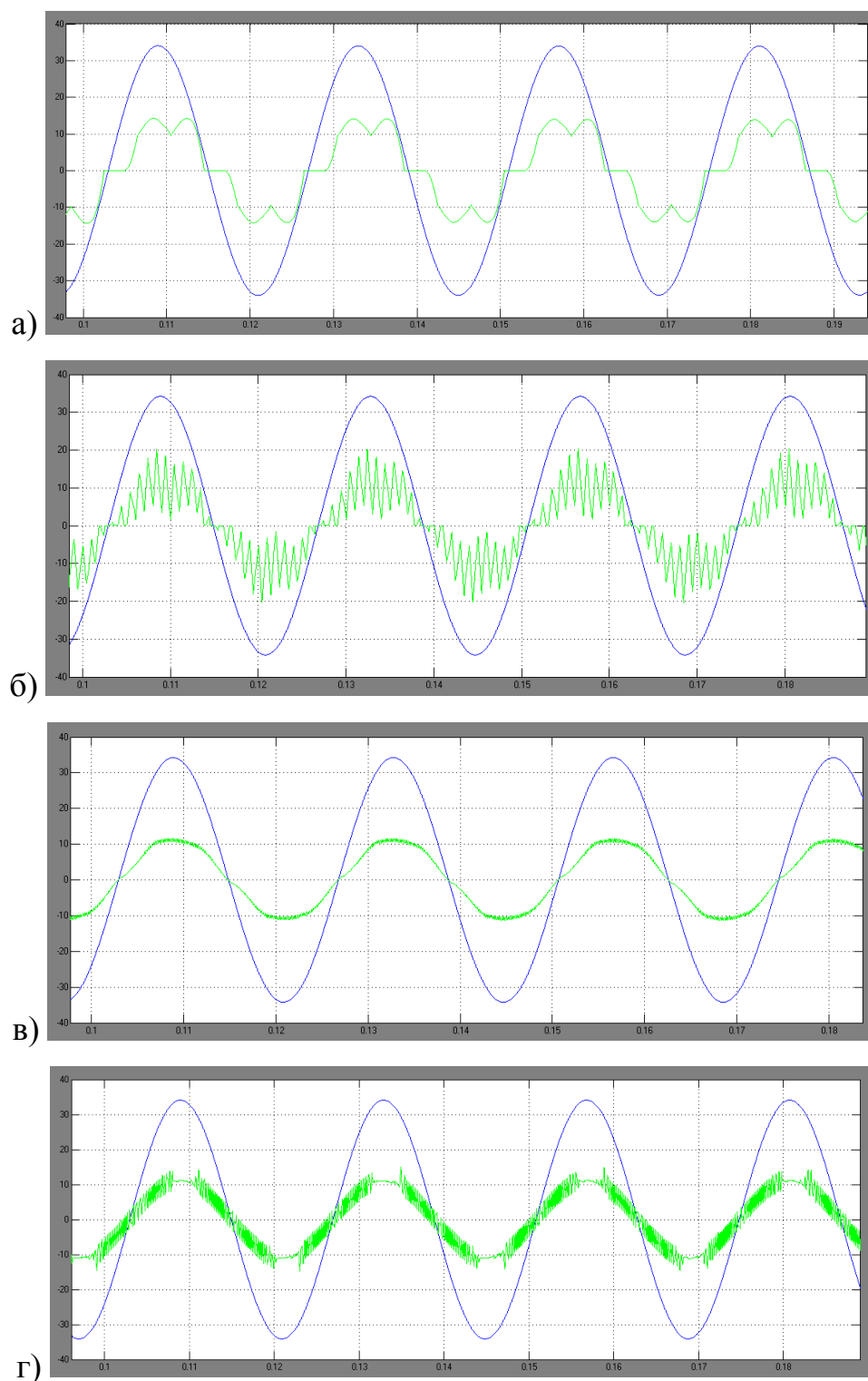


Рис. 4.43. Осцилограми з комп'ютерного симулювання фазних ЕРС (В) і струму якоря СГПМ (x 0,2 А) за швидкості вітру 5 м/с для різних систем навантаження:

- а) пасивної, 4 АБ; б) з DC-DC-перетворювачем;
 в) з DC-DC-перетворювачем та коректором струму; г) з АВН

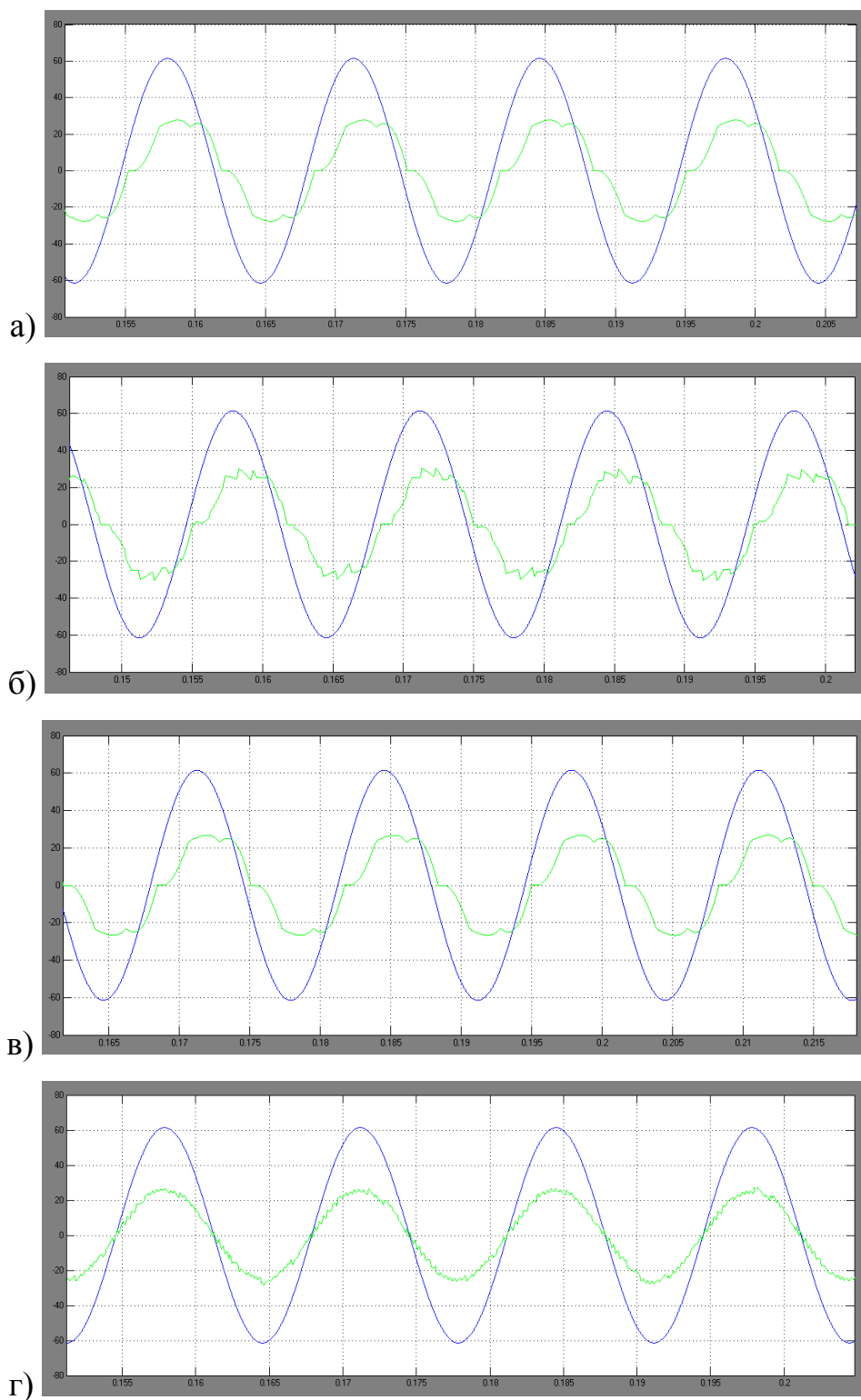


Рис. 4.44. Осцилограми з комп'ютерного симулювання фазних ЕРС (В) і струму якоря СГПМ ($\times 0,333$ А) за швидкості вітру 9 м/с для різних систем:

- а) пасивної, 6 АБ; б) з DC-DC-перетворювачем;
в) з DC-DC-перетворювачем та коректором струму; г) з АВН

4.2.2. Обґрунтування ефективних способів орієнтації ФЕП на сонце.

Нижче наведено п'ять способів керування положенням ФЕП, які було розглянуто в цій роботі:

- 1) панель нерухома, обернена на південь і встановлена під оптимальним кутом нахилу до горизонту;
- 2) панель обернена на південь, а кут нахилу до горизонту встановлюється вручну посезонно на оптимальну величину;
- 3) азимутальне стеження з погодинним кроком при оптимальному значенні кута нахилу панелі до горизонту;
- 4) аналогічне варіанту 3, але з посезонною зміною кута нахилу панелі до горизонту;
- 5) двокоординатне стеження панелі за сонцем.

Відповідно до розрахунків, проведених за виразами (1.21)-(1.29), були отримані залежності значень притоку енергії річної сумарної СР від кутів нахилу ФЕП до горизонту при азимутальному стеженні ФЕП за сонцем, при орієнтації ФЕП строго на південь та при двокоординатному стеженні ФЕП (рис. 4.45).

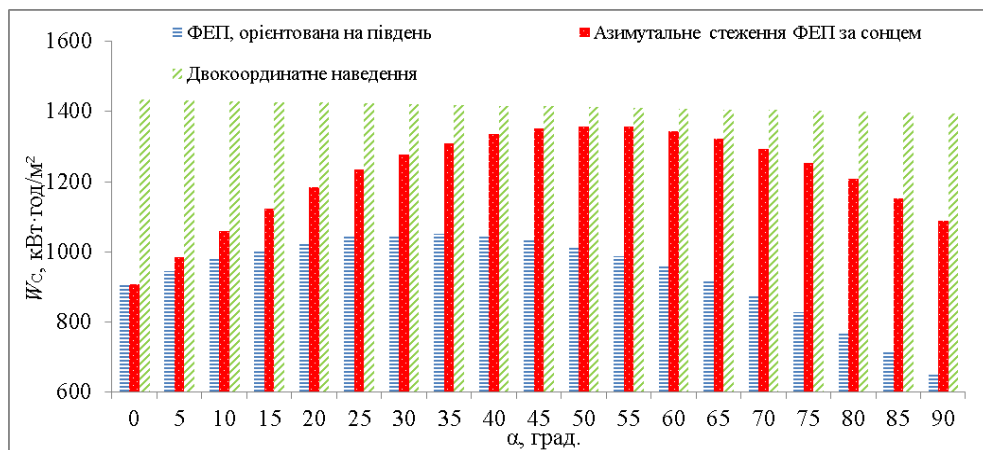


Рис. 4.45. Стовпчасті діаграми значень притоку енергії річної сумарної СР в залежності від кута нахилу ФЕП до горизонту при азимутальному стеженні ФЕП за сонцем, при орієнтації ФЕП строго на південь та при двокоординатному стеженні панелі за сонцем

З рис. 4.45 можна зробити висновок, що для м. Львова оптимальним річним кутом нахилу ФЕП до горизонту при її орієнтації строго на південь є 33° , а при азимутальному стеженні ФЕП за сонцем – 51° . При двокоординатному стеженні ФЕП система слідування за сонцем кожної миті обертає панель до сонця таким чином, щоб кут, який утворюється між напрямом на сонце та ФЕП, був рівним 90° [141], тому, при такому наведенні отримується максимум енергії від сонця. Таке орієнтування ФЕП будемо вважати базовим у відносних порівняннях з іншими видами орієнтування панелей.

Правильний вибір кута нахилу ФЕП до горизонту є дуже важливим при проектуванні чи встановленні фотовольтаїчних систем електроживлення. Згідно [167], для зорієнтованої строго на південь ФЕП при відхиленні її кута нахилу до горизонту від його оптимального значення на 15° можна втратити до 20% потужності на виході системи, при його відхиленні на 30° – до 40%, а при відхиленні від напрямку на південь на 90° – до 100% потужності. Також певне зменшення потужності на виході ФЕП може відбуватися під час затінення панелі, тому при встановленні ФЕП варто звернути увагу і на цей фактор.

Певне збільшення притоку сонячної енергії можна очікувати від посезонної зміни кута нахилу ФЕП до горизонту, що можна робити вручну. На рис. 4.46 наведені результати розрахованих залежностей притоку енергії посезонної сумарної СР від кутів нахилу ФЕП до горизонту при орієнтації панелі строго на південь і при погодинному азимутальному стеженні ФЕП за сонцем.

Проаналізувавши рис. 4.46, можна зробити висновок, що для м. Львова сезонними оптимальними кутами нахилу ФЕП до горизонту при орієнтації панелі строго на південь є кути: зима – 65° , осінь – 53° , весна – 32° , літо – 21° . А при азимутальному стеженні панелі за сонцем сезонними оптимальними кутами нахилу ФЕП до горизонту є: зима – 67° , осінь – 60° , весна – 51° , літо – 46° . Також з рисунку видно, що застосування азимутального стеження ФЕП за сонцем краще проявить себе влітку і весною, ніж осінню та взимку.

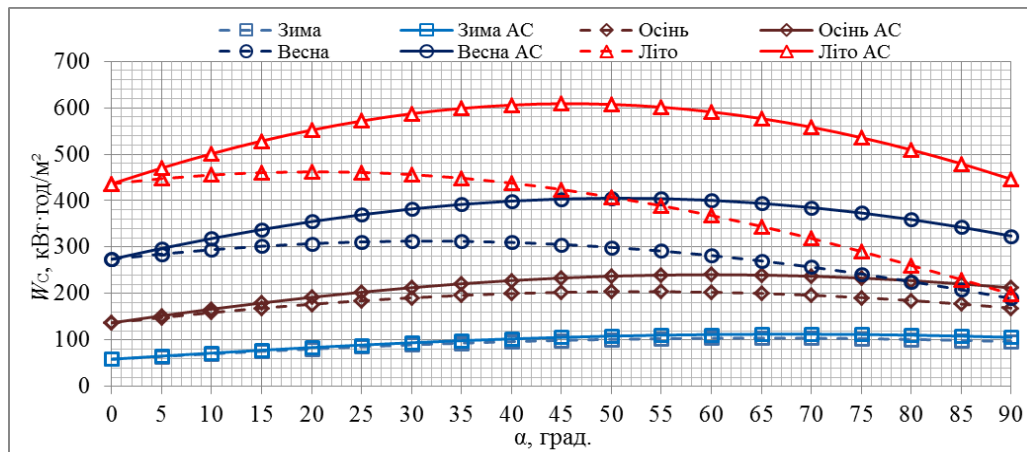


Рис. 4.46. Залежності значень притоку енергії посезонної сумарної СР від кутів нахилу ФЕП до горизонту для нерухомої строго орієнтованої на південь ФЕП (пунктирні лінії) і при азимутальному стеженні ФЕП за сонцем (суцільні лінії), (АС – азимутальне стеження)

Для кожного з п'яти способів керування положенням ФЕП з відповідними для них оптимальними кутами нахилу панелі до горизонту було розраховано значення притоку енергії річної сумарної СР W_C та значення ЕЕ на виході ФЕП E протягом року. Також було розраховано показники енергоефективності відповідного способу керування як відношення значення кількості ЕЕ, отриманої кожним зі способів керування положенням ФЕП, до значення кількості ЕЕ, отриманої при двокоординатному наведенні ФЕП (табл. 4.3).

Для кращого порівняння ефективності різних способів положення та/чи орієнтування ФЕП за сонцем було побудовано стовпчасту діаграму сумарних помісячних кількостей ЕЕ, згенерованої конкретною ФЕП при відповідному способі орієнтації (рис. 4.47).

Аналізуючи дані з табл. 4.3 та рис. 4.47, можна зробити висновок, що у випадку азимутального стеження ФЕП за сонцем можна отримати на 30% більше ЕЕ на виході ФЕП, ніж при орієнтуванні панелі строго на південь. Двокоординатне стеження панелі за сонцем дозволить отримати ще на 5% більше ЕЕ за рік, ніж при азимутальному, але, враховуючи суттєво більшу вартість, такий спосіб стеження панелей за сонцем не є ефективним для м. Львова.

Значення притоку енергії сумарної річної W_C , значення ЕЕ на виході ФЕП E , показники енергоефективності відповідного способу наведення ФЕП на сонце E_n/E_5 для м. Львова за 2013 р.

№	Спосіб керування положенням ФЕП	W_C , кВт·год/м ²	E , кВт·год	E_n/E_5
1	ФЕП, орієнтована на південь, $\alpha = 33^\circ$	1064,6	152,4	0,741
2	ФЕП, орієнтована на південь, α посезонно змінюється	1101,2	157,6	0,768
3	ФЕП з азимутальним стеженням, $\alpha = 51^\circ$	1372,8	198,4	0,967
4	ФЕП з азимутальним стеженням, α посезонно змінюється	1384,9	200,2	0,976
5	ФЕП з двокоординатним стеженням	1422,0	205,0	1,000

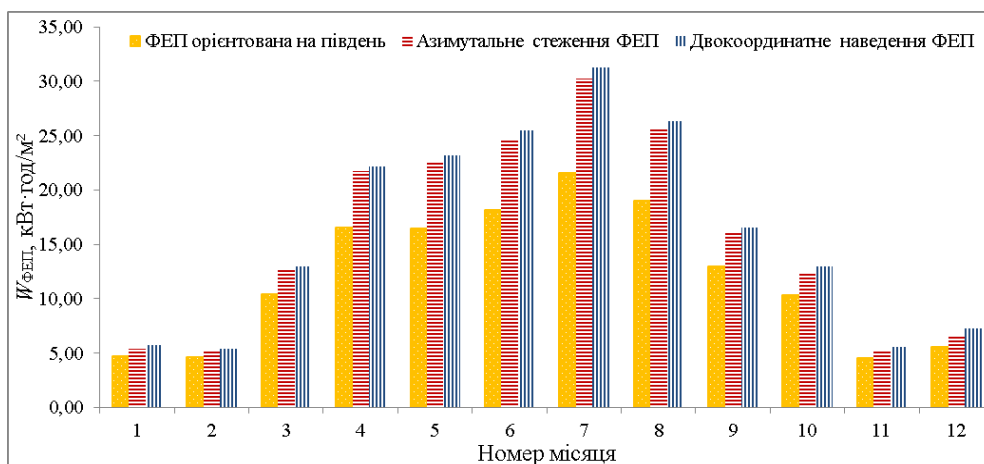


Рис. 4.47. Стовпчаста діаграма сумарних помісячних кількостей ЕЕ, що генерується конкретною ФЕП при відповідному способі наведення

4.3. Створення макетного взірця та експериментальні дослідження блока генераторів для ВЕУ з ВВО

4.3.1. Макетний взірець блока генераторів. Для макетного взірця ВЕУ з

ВВО було сконструйовано блок генераторів, у якому на одній осі розміщено обидва генератори: електричний – СГПМ, і тепловий – ЕПМЕТ.

У дослідному макетному взірці використано двоякірну конструкцію СГПМ (рис. 4.48), яка має наступні переваги: відсутність зубцевого моменту завдяки гладкій конструкції якоря, що дає можливість стартувати ВЕУ за швидкості вітру 2,5-3 м/с; зменшений діаметр порівняно з одноякірною конструкцією за того ж значення потужності.



Рис. 4.48. Загальна конструкція макетного взірця двоякірного СГПМ

Окремі котушки якоря закріплено з допомогою епоксидного клею на навитому з електротехнічної сталі ярмі. Обидва якорі закріплено на дюралевих частинах корпусу блока. У кришці і несучій станині блока генераторів виточені посадки під підшипники, у яких обертається спільний для обох генераторів стальний вал. На валу за допомогою фланця закріплено індуктор з двостороннім розміщенням полюсів з постійних магнітів: по 24 магніти зі сплаву NdFeB з кожного боку індуктора. Блок генераторів закріплюється на несучій станині, вифрезерованій з дюралю товщиною 20 мм.

ЕПМЕТ складається з індуктора із 20 полюсів, які закріплено до нижньої частини несучої станини, та дискового ротора, що знаходиться на спільному валу (рис. 4.49). Кожен полюс складається із двох вифрезерованих зі сталі деталей – зубця і наконечника. На зубці через ізоляційні прокладки намотано мідним проводом котушки, які прикручені гвинтами до сталюого ярма, яке служить магнітопроводом. Між собою котушки електрично з'єднані за допомогою паяння, причому через одну зі зміною початків і кінців. Це дасть змогу отримати чергування північних і південних магнітних полюсів за протікання через послідовно з'єднані котушки індуктора постійного струму.



Рис. 4.49. Конструкція ЕПМЕТ: а) індуктор: б) ротор (вигляд знизу)

Після виготовлення і комутування індуктора він був просочений електротехнічним лаком і запечений при підвищеній температурі, що забезпечить його електричну стійкість та захист магнітопроводу від корозії при роботі у вологому середовищі.

Ротор ЕПМЕТ діаметром 380 мм виточено зі сталюї плити товщиною 20 мм (рис. 4.49, б), причому в нижній його частині проточені ребра, що розширюють площу теплового контакту із теплоносієм і дадуть змогу ефективніше відводити від ротора теплоту. З метою надійного захисту від корозії, ротор ЕПМЕТ пофарбовано високостійкою порошковою фарбою за високої температури нанесення.

На верхню теплосприймаючу поверхню ротора за допомогою спеціального теплопровідного клею (коефіцієнт теплопровідності $1,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, теплостійкість 300°C) приклеєно 8 секторів з мідної фольги товщиною $0,3 \text{ мм}$. Це, відповідно до проведених розрахунків [92], забезпечить підвищення ефективності генерування теплоти при проходженні змінного за обертання ротора в стаціонарному магнітному полі магнітного потоку через тіло ротора.

Далі блок генераторів було зібрано з метою проведення випробувань (рис. 4.50), які не триватимуть довго, тому можна буде не використовувати теплоносій для відводу генерованої теплоти.

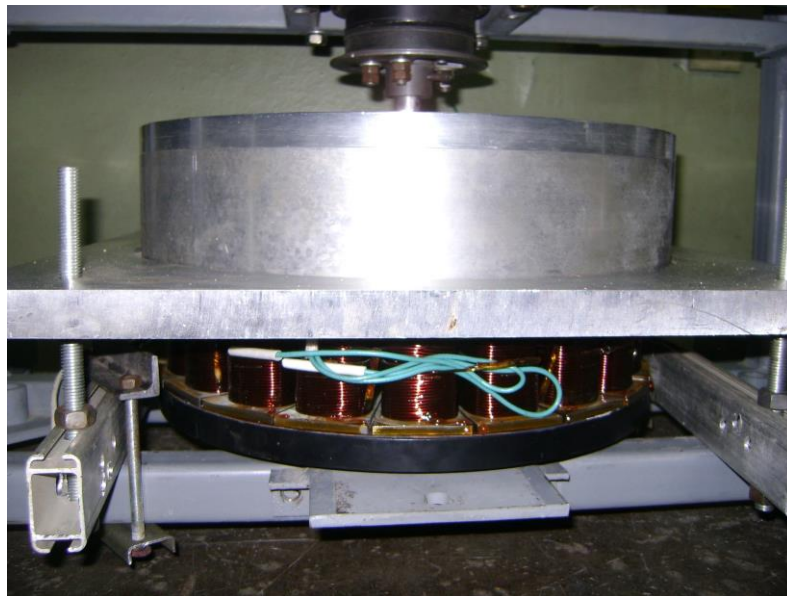


Рис. 4.50. Блок генераторів у зібраному вигляді

4.3.2. Методика проведення фізичних експериментів та їх результати.

Для дослідження ЕПМЕТ була зібрана дослідна установка, принципова схема якої приведена на рис. 4.51, а вигляд – на рис. 4.52.

Виготовлений макетний зразок блока генераторів, закріплений на зварній рамі, приводився в рух через конічний редуктор з передавальним числом 4 двигуном постійного струму М з такими номінальними параметрами: $U_{\text{н}} = 57 \text{ В}$, $I_{\text{н}} = 11 \text{ А}$, $M_{\text{н}} = 4,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $n_{\text{н}} = 1000 \text{ об/хв}$. У корпусі привідного двигуна розміщено також тахогенератор постійного струму ВР з крутизною характеристики $0,02 \text{ В}\cdot\text{хв}$. Тахогенератор навантажено на номінальний опір $R = 10 \text{ кОм}$, а його

напруга вимірюється вольтметром V2. Якірне коло двигуна М живиться через дросель L від мостового діодного випрямляча VD, який підключено до вихідної обмотки автотрансформатора Т. Напруга і струм якірного кола вимірюються відповідно вольтметром V1 і амперметром A1. Обмотка збудження ЕПМЕТ живиться від блока регульованої постійної напруги БЖ, а струм збудження вимірюється амперметром A2.

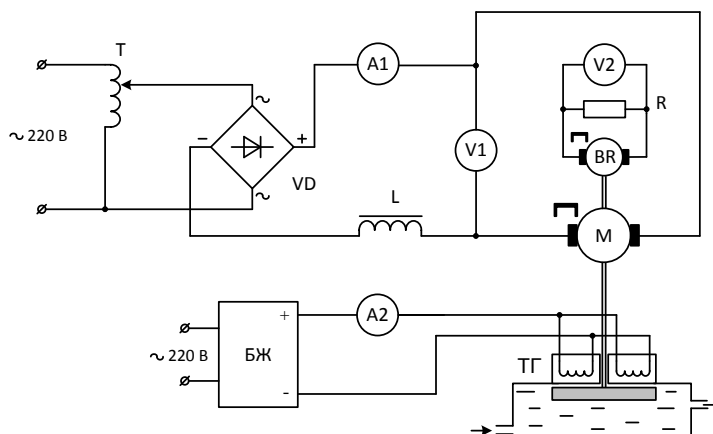


Рис. 4.51. Принципова схема установки для проведення досліджень ЕПМЕТ



Рис. 4.52. Фото макетного взірця блока генераторів з привідним електродвигуном

Було проведено кілька серій експериментів, у яких за допомогою автотрансформатора регулювалася частота обертання привідного двигуна М і, відповідно, ротора ЕПМЕТ при сталих значеннях струму його збудження. При

цьому в кожній точці вимірювалися напруга і струм якоря двигуна $M - U_1$ і I_1 та частота обертання n . Залежність механічної потужності на валу ЕПМЕТ, яка розсіюється у вигляді теплоти в його роторі, від частоти обертання за конкретного значення струму збудження ЕПМЕТ визначали за виразом

$$P_T(n) = U_1 I_1 - I_1^2 R_{\text{я.екв}}(I_1) - \Delta P_M(n), \quad (4.11)$$

де $R_{\text{я.екв}}(I_1)$ – експериментально визначений еквівалентний опір якірнього кола привідного двигуна M (разом з опором щіткового контакту) при значенні струму якоря I_1 ; $\Delta P_M(n)$ – залежність потужності механічних втрат на тертя в опорах дослідної установки від частоти обертання n .

Значення останнього доданку у виразі (4.11) можна визначити з аналогічного досліду, проведеного для ЕПМЕТ без струму збудження:

$$\Delta P_M(n) = U_{10} I_{10} - I_{10}^2 R_{\text{я.екв}}(I_{10}), \quad (4.12)$$

де U_{10} , I_{10} – значення напруги і струму якоря привідного двигуна при обертанні ЕПМЕТ без його збудження.

У попередніх експериментах визначали наступні залежності, необхідні для розрахунків за (4.11): $R_{\text{я.екв}}(I_1)$ при загальмованому роторі привідного двигуна (рис. 4.53), $\Delta P_M(n)$ за відсутності збудження ЕПМЕТ (рис. 4.54).

Для розрахунків з допомогою персонального комп'ютера ці залежності апроксимовано з використанням програми CURVEXPERT виразами такого виду:

$$R_{\text{я.екв}}(I_1) = 1,417 - 0,0988I_1 + 0,005725I_1^2 - 0,000119I_1^3 \quad (4.13)$$

$$\Delta P_{\Sigma M}(n) = -1,113 + 0,04946n + 0,0008346n^2. \quad (4.14)$$

Результати розрахунків за виразом (4.11) з використанням залежностей (4.13) і (4.14) представлено на рис. 4.55 разом із отриманими теоретично шляхом комп'ютерного моделювання магнітних і теплових полів у ЕПМЕТ. Розбіжність між експериментальними і теоретичними результатами, яка не перевищує 17%, є

цілком задовільною для даного роду досліджень.

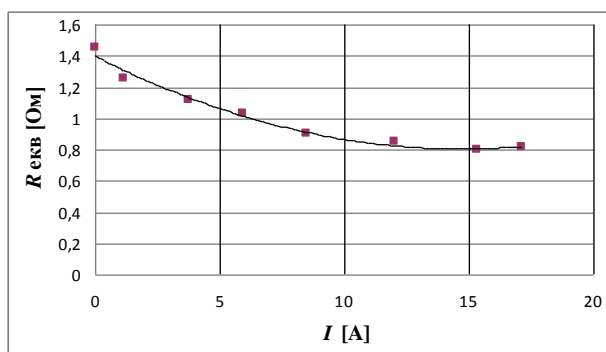


Рис. 4.53. Експериментально отримана залежність еквівалентного активного опору якірного кола привідного двигуна від струму якоря

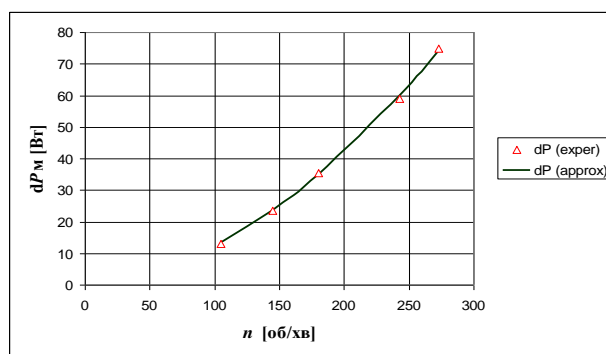


Рис. 4.54. Експериментально отримана залежність потужності сумарних втрат неробочого ходу привідного двигуна від його частоти обертання

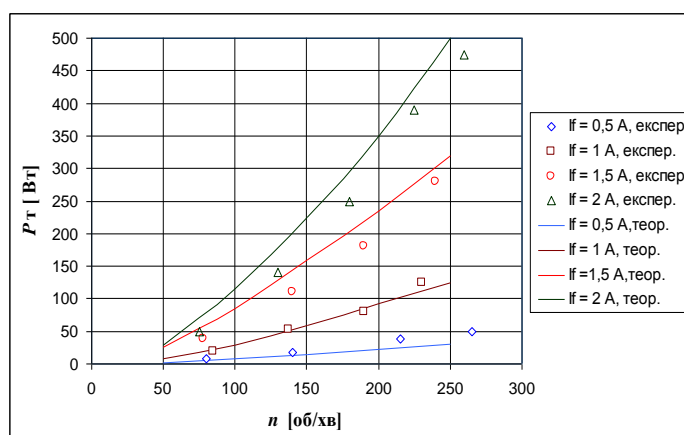


Рис. 4.55. Порівняння експериментально і теоретично отриманих залежностей потужності, що виділяється у вигляді теплоти в роторі ЕПМЕТ від його частоти обертання за різних значень струму збудження

4.4. Функціональна схема системи керування автономно-мережевою ВССЕ

На рис. 4.56 показано приклад реалізації системи керування автономно-мережевою ВССЕ. Об'єднання пристроїв постачання ЕЕ (ВЕУ з ВВО, ФЕУ та ЦМЖ) та пристроїв її споживання (приймачі П) і нагромадження (АБ) здійснюється мережею постійної напруги DC bus з номінальним значенням 220 В.

Приймачі електричного струму в даній системі електроживлення поділено на приймачів змінного струму P_{AC} (кухонне обладнання, помпи, ручний інструмент) та приймачів постійного струму P_{DC} (електронагрівальна техніка, освітлювальні лампи, мультимедійне обладнання, комп'ютери, сигналізація). Оскільки, останнім часом кількість приймачів P_{AC} постійно зменшується, то споживач має змогу суттєво знизити встановлену потужність інвертора напруги ІН.

Для роботи запропонованої автономно-мережевої ВССЕ необхідна дворівнева система керування: на нижньому рівні відбувається автоматичне керування її локальними системами генерування, нагромадження та споживання ЕЕ, а на верхньому – керування енергоперетоками в системі відповідно до розробленого в розділі 3 алгоритму.

До систем керування нижнього рівня відносяться такі локальні системи:

- система оптимального керування роботою ФЕУ, що реалізується за допомогою однонапрявленого підвищувального напівпровідникового перетворювача постійної напруги (ППН) DC-DC1, який працює за певним алгоритмом для роботи ФЕП в ТВМП (п. 1.2.2); керування системою здійснює мікроконтролер $МК_{ФЕП}$;
- система оптимального керування роботою ВЕУ з ВВО шляхом оптимального навантаження СГПМ за допомогою однонапрявленого підвищувального ППН DC-DC2 (п. 4.2.1), який також працює за певним алгоритмом для роботи ВЕУ в ТВМП; керування системою здійснює мікроконтролер $МК_{ВЕУ}$;

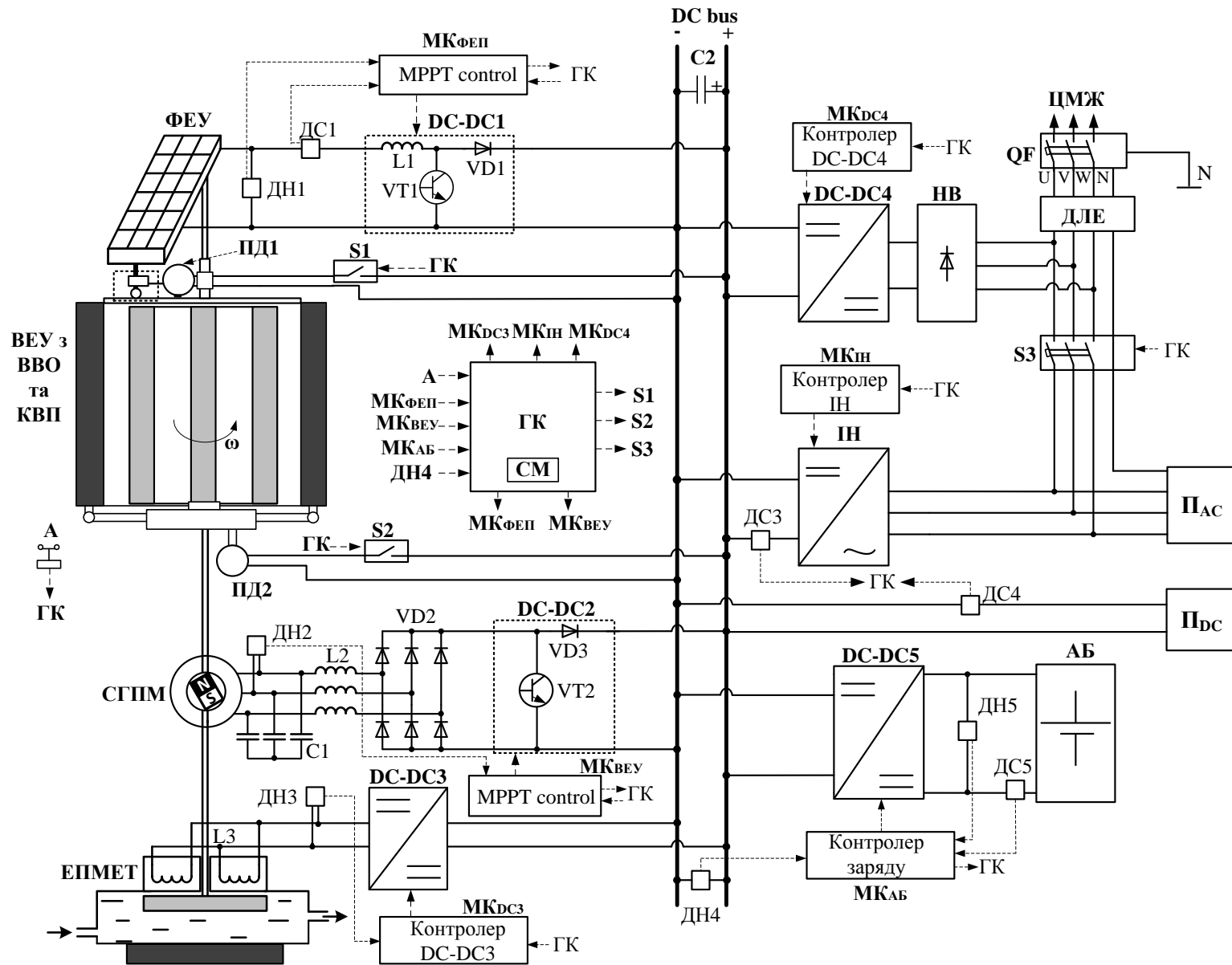


Рис. 4.56. Функціональна схема системи керування автономно-мережевою ВССЕ

- система керування тепловою потужністю ЕПМЕТ шляхом регулювання струму його збудження за допомогою однонапрявленого понижувального ППН DC-DC3; керування системою здійснює мікроконтролер МК_{DC3};
- система перетворення та регулювання напруги при споживанні ЕЕ з ЦМЖ, що реалізується за допомогою однонапрявленого понижувального ППН DC-DC4; керування системою здійснює мікроконтролер МК_{DC4};
- система керування процесом заряджання-розряджання АБ, що реалізується за допомогою двонапрявленого ППН DC-DC5; керування системою здійснює мікроконтролер МК_{АБ}.

У процесі роботи завжди один із ППН повинен виконувати функцію автоматичного регулювання напруги мережі DC bus з метою її підтримання на рівні 220 В. Таку задачу найкраще виконуватиме один ППН, який з'єднує мережу постійної напруги з пристроєм, що може бути як джерелом, так і споживачем ЕЕ. В системі цю функцію виконує двонапрявлений ППН DC-DC5, проте лише в режимах, коли АБ не є повністю зарядженою чи розрядженою. Тому в системі постійно підтримується робочий режим АБ шляхом балансування режимів генерування та споживання ЕЕ.

Керування системою на вищому рівні здійснює головний контролер ГК, який отримує відповідні сигнали з локальних систем та давачів і формує завдання для керування енергоперетоками, забезпечуючи безперебійне та якісне електричне живлення споживача. Крім завдань для керування мікроконтролерами локальних систем керування, ГК також керує електронними ключами для здійснення відповідних комутацій в системі:

- S1 – забезпечує програмне керування поворотним механізмом ФЕУ за допомогою привідного двигуна ПД1;
- S2 – забезпечує керування поворотним механізмом направляючих КВП за допомогою привідного двигуна ПД2 для захисту ВР від шквальних вітрів;
- S3 – здійснює підмикання приймачів змінного струму П_{АС} до ЦМЖ;

Біля вузла живлення системи від ЦМЖ встановлений двотарифний лічильник ЕЕ ДЛЕ, який дає змогу заощаджувати кошти споживачу за рахунок

застосування низького тарифу на ЕЕ у нічний період доби.

У ВССЕ також передбачено систему моніторингу СМ. Головний контролер ГК постійно зв'язує мобільний пристрій власника об'єкту з СМ для відслідковування процесів, що відбуваються у системі.

На схемі на рис. 4.56 представлено структуру автономно-мережевої ВССЕ, де використовуються АБ як засіб нагромадження ЕЕ, а також ЕПМЕТ як засіб для перетворення зайвої механічної енергії ВР в теплову енергію. Проте можуть бути реалізовані і простіші варіанти структур таких ВССЕ – без використання АБ чи ЕПМЕТ.

4.5. Висновки до розділу

1. На основі проведених досліджень із застосуванням CFD встановлено, що використання КВП має позитивний ефект для роботи ВР малих розмірів ($R=0,45$ м) при всіх, вибраних для моделювань, швидкостях вітру – значення C_{Pmax} за оптимальної швидкохідності ВР $\lambda_{opt} = 1,9 - 2,1$ при застосуванні КВП зростає на: 70,2% при $V_B = 4$ м/с, 52,6% при $V_B = 7$ м/с та 59,7% при $V_B = 10$ м/с. Показано, що запропонований КВП забезпечує позитивний ефект і на роботу ВР більших розмірів.

2. Створено макетний взірець ВЕУ з ВВО та КВП, побудований за результатами комп'ютерного моделювання. Натурні експерименти підтвердили працездатність та ефективність запропонованої конструкції ВЕУ. Так, завдяки КВП ВР надійно стартував за швидкості вітру 3 м/с та створював механічний момент, який досить добре узгоджувався з результатами комп'ютерного моделювання.

3. Для оптимального регулювання електричного навантаження ВЕУ запропоновано комбіновану систему керування з малопотужним DC-DC-перетворювачем, який працює на малих та середніх швидкостях вітру, а на великих – ВЕУ автоматично регулюється пасивним способом, коли генератор безпосередньо навантажується через діодний міст на АБ з оптимальною

напругою. Такій системі властиві наступні переваги: практично максимальний відбір потужності від вітру в усьому діапазоні зміни його швидкості, високі значення ККД електромеханічної частини, низька вартість.

4. З використанням створеного програмного продукту проведено порівняння низки способів керування положенням ФЕП відносно сонця та встановлено, що у випадку азимутального стеження ФЕП за сонцем можна отримати на 30% більше ЕЕ на виході з ФЕП, ніж при нерухомій панелі, зорієнтованій строго на південь. Для азимутального стеження ФЕП за сонцем оптимальний кут нахилу її до горизонту складає 51° , а для ФЕП, орієнтованої строго на південь, – 33° .

5. Створено макетний взірець ВЕУ з ВВО у якому на одній осі розміщено обидва генератори: електричний – СГПМ, і тепловий – ЕПМЕТ, що дає змогу генерувати одночасно ЕЕ та теплову енергію. Результати експериментальних досліджень підтвердили адекватність математичних моделей, за якими розраховувалися параметри конструкції ЕПМЕТ.

6. Розроблено та описано повну функціональну схему системи керування автономно-мережевою ВССЕ, яка може служити вихідною інформацією для створення практичних варіантів таких систем різної складності та з різним набором складових компонентів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання створення перспективних конфігурацій ВССЕ малопотужних об'єктів з оптимальними параметрами основних складових елементів, а також розроблення ефективної для роботи в умовах низькопотенціальних ресурсів ПДЕ конструкції вітросонячної установки для реалізації цих систем.

Щодо отриманих результатів можна зробити такі висновки.

1. Сформована ЕБМД, в яку входить інформація про погодинні значення швидкості і напрямку вітру, тривалості сонячного сяйва в інтервалах істинного часу, температури навколишнього середовища у м. Львові протягом 2013 р., може служити вихідною інформацією для проведення імітаційного математичного моделювання роботи ВССЕ з метою їх параметричної оптимізації.

2. Аналіз річного вітрового та сонячного потенціалів для м. Львова показав їх низький рівень, за якого перспективу має комбіноване отримання ЕЕ від ПДЕ вітру і сонця. З цією метою запропоновано нову конструкцію вітросонячної установки, яка має підвищені енергетичні показники в умовах низькопотенціального поновлюваного ресурсу. Зокрема, енергетична ефективність роботи ВЕУ покращується завдяки застосуванню КВП, який в конструкції вітросонячної установки має ще низку додаткових функцій, а ефективність ФЕП зростає завдяки застосуванню системи стеження її на сонце.

3. На основі ЕБМД в середовищах Microsoft Excel та Matlab створено програмний продукт для розрахунку питомої (на одиницю площі омивання ВЕУ та одиницю площі ФЕП) кількості погодинної та сумарної за рік ЕЕ на виході з вітросонячної установки з конкретними параметрами і способом керування при довільному її розміщенні.

4. Як перспективну для застосування в Україні з метою енергозабезпечення окремих об'єктів, крім автономної та мережевої, запропоновано також автономно-мережеву вітросонячну систему, яка рекомендується для відносно потужних не газифікованих споживачів ЕЕ з метою

отримання бажаних обсягів ЕЕ та з одночасним збереженням її стандартів якості. Для всіх вказаних конфігурацій ВССЕ обґрунтовано критерії енергоефективності, розроблено алгоритми керування та створено методику для проведення оперативної техніко-економічної параметричної оптимізації складових елементів з використання ГА.

5. Використання стаціонарного симетричного КВП обґрунтованої оптимальної конструкції у складі ВЕУ з Н-ротором номінальною потужністю 5 кВт дає змогу підвищити значення коефіцієнта відбору потужності від вітру на 26-37%, причому більші значення мають місце при малих швидкостях вітру, що є переважаючими на території України.

6. Для оптимального регулювання електричного навантаження малопотужної ВЕУ, доцільно застосувати запропоновану комбіновану активно-пасивну систему, яка складається з малопотужного (0,35 номінальної потужності ВЕУ) DC-DC-перетворювача, який працює на малих та середніх швидкостях вітру. На великих вітрах ВЕУ ефективно автоматично регулюється пасивним способом, коли СГПМ безпосередньо навантажується через діодний міст на ланку постійної напруги оптимальної величини.

7. Встановлено, що у випадку азимутального стеження ФЕП за сонцем можна отримати на її виході у м. Львові на 30% більше ЕЕ, ніж при нерухомій панелі, зорієнтованій строго на південь. Рекомендованим оптимальним для азимутального орієнтування ФЕП за сонцем є кут нахилу до горизонту – 51° , а для нерухомої ФЕП, орієнтованої строго на південь – 33° .

8. Отримані теоретичні результати впроваджено в навчальний процес кафедри «Електропривод та комп'ютеризовані електромеханічні системи» Національного університету «Львівська політехніка», а практичні результати використовуються на основі госпдоговорів у Спеціальному конструкторському бюро ЕМС Львівської політехніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A solution for low voltage ride through of induction generators in wind farms using magnetic energy recovery switch – Master thesis [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/25661>.
2. Abedi S. A comprehensive method for optimal power management and design of hybrid res-based autonomous energy systems [Текст] / S. Abedi, A. Alimardani, G. B. Gharehpetian, S. H. Hosseinian // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16. – P. 1577-1587.
3. Ahamed E. Z. Aero-design analysis for modified Darrieus based-straight bladed vawt systems [Текст] / E. Z. Ahamed, A. R. Gowtham Ram // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 04, No. 05. – P. 510-514.
4. Ahmad J. A Voltage based maximum power point tracker for low power and low cost photovoltaic applications [Текст] / J. Ahmad, H. J. Kim // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2009. – Vol. 60. – P. 712-715.
5. Ahmed A. Power fluctuations suppression of stand-alone hybrid generation combining solar photovoltaic/wind turbine and fuel cell systems [Текст] / A. Ahmed, M. Miyatake, A. Al-Othmana // Energy Conversion and Management. – 2008. – Vol. 49. – P. 2711-2719.
6. Ahsan M. Cfd analysis of wind concentrator [Текст] / M. Ahsan, R. Bishnoi, S. K. Singh // International Journal of Mechanical and Industrial Technology. – 2014. – Vol. 2, No. 2. – P. 51-78.
7. Ai B. Computer-aided design of pv/wind hybrid system [Текст] / B. Ai, H. Yang, H. Shen, X. Liao // Renewable Energy. – 2003. – Vol. 28. – P. 1491-1512.
8. Akello P. O. Performance analysis of a direct drive permanent magnet generator for small wind energy applications [Текст] / P. O. Akello, F. X. Ochieng, J. N. Kamau // Journal of Sustainable Research in Engineering. – 2014. – Vol. 1, No. 3 – P. 1-9.

9. Alaimo A. 3D cfd analysis of a vertical axis wind turbine [Текст] / A. Alaimo, A. Esposito, A. Messineo, C. Orlando, D. Tumino // *Energies*. – 2015. – Vol. 8. – P. 3013-3033.
10. Alexandru C. Different tracking strategies for optimizing the energetic efficiency of a photovoltaic system [Текст] / C. Alexandru, C. Pozna // *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR) (22-25 May 2008, Cluj-Napoca, Romania)*. – 2008. – Vol. 3. – P. 434-439.
11. Ashok S. Optimised model for community-based hybrid energy system [Текст] / S. Ashok // *Renewable Energy*. – 2007. – Vol. 32. – P. 1155-1164.
12. Babu B. C. Doubly-fed induction generator for variable speed wind energy conversion systems - modeling & simulation [Текст] / B. C. Babu, K. B. Mohanty // *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. – 2010. – Vol. 2, No. 1. – P. 141-147.
13. Bala B. Optimal design of a pv-diesel hybrid system for electrification of an isolated island – Sandwip in Bangladesh using genetic algorithm [Текст] / B. Bala, A. Saiful // *Energy for Sustainable Development*. – 2009. – Vol. 13. – P. 137-142.
14. Baroudi J. A. A review of power converter topologies for wind generators [Текст] / J. A. Baroudi, V. Dinavahi, A. M. Knight // *Renewable Energy*. – 2007. – Vol. 32 – P. 2369-2385.
15. Belfkira R. Optimal sizing study of hybrid wind/pv/diesel power generation unit [Текст] / R. Belfkira, L. Zhang, G. Barakat // *Solar Energy*. – 2011. – Vol. 85. – P. 100-110.
16. Benatiallah A. Modelling and optimisation of wind energy systems [Текст] / A. Benatiallah, L. Kadi, B. Dakyo // *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. – 2010. – Vol. 4, No. 1. – P. 143-150.
17. Benmeddour A. Overview of wind energy research and development at NRC-IAR (Canada) [Текст] / A. Benmeddour, A. Wall, B. McAuliffe, P. J. Penna, J. C. Su // *Revue des Energies Renouvelables*. – 2010. – P. 69-80.

18. Beri H. Double multiple stream tube model and numerical analysis of vertical axis wind turbine [Текст] / H. Beri, Y. Yao // Energy and Power Engineering. – 2011. – Vol. 3. – P. 262-270.
19. Bhandari B. Optimization of hybrid renewable energy power systems: a review [Текст] / B. Bhandari, K. T. Lee, G. Y. Lee, Y. M. Cho, S. H. Ahn // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2015. – Vol. 2, No.1. – P. 99-112.
20. Bilal B. Methodology to size an optimal stand-alone pv/wind/diesel/battery system minimizing the levelized cost of energy and the CO₂ emissions [Текст] / B. Bilal, V. Sambou, C. Kebe, P. Ndiaye, M. Ndongo // Energy Procedia. – 2012. – Vol. 14. – P. 1636-1647.
21. Billinton R. Capacity expansion of small isolated power systems using pv and wind energy [Текст] / R. Billinton, R. Karki // IEEE Transactions on Power Systems. – 2001. – Vol. 16, No. 4. – P. 892-897.
22. Bindu G. H. Design and modelling of induction generator wind power systems by using MATLAB/SIMULINK [Текст] / G. H. Bindu, P. N. Mandadi // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2014. – Vol. 3, No. 8. – P. 11472-11478.
23. Bruska S. Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance [Текст] / S. Bruska, R. Lanzafame, M. Messina // International Journal Energy Environment Engineering. – 2014. – Vol. 5. – P. 333-340.
24. Bumby J. R. A permanent magnet generator for small scale wind turbines [Текст] / J. R. Bumby, N. Stannard, R. Martin // International Conference on Electrical Machines (6-9 September 2008, Vilamoura, Portugal). – 2008. – P. 1-6.
25. Byrne J. Evaluating the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: A GIS - and lifecycle cost-based assessment of Western China's options [Текст] / J. Byrne, A. Zhou, B. Shenl, K. Hughes // Energy Policy. – 2007. – Vol. 35. – P. 4391-4401.

26. Carrigan T. J. Aerodynamic shape optimization of a vertical-axis wind turbine using differential evolution [Текст] / T. J. Carrigan, B. H. Dennis, Z. X. Han, B. P. Wang // International Scholarly Research Network Renewable Energy. – 2012. – P. 168-179.
27. Castelli M. R. Effect of blade number on a straight-bladed vertical-axis Darreius wind turbine [Текст] / M. R. Castelli, S. D. Betta, E. Benini // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – Vol. 6. – P. 256-262.
28. Celik A. Optimisation and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic–wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems [Текст] / A. Celik // Energy Conversion and Management. – 2002. – Vol. 43. – P. 2453-2468.
29. Chedid R. Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems [Текст] / R. Chedid, S. Rahman // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1997. – Vol. 12, No. 1. – P. 79-85.
30. Chiarelli M. A new configuration of vertical axis wind turbine: an overview on efficiency and dynamic behavior [Текст] / M. Chiarelli, A. Massai, D. Atzeni, F. Bianco // Journal of Energy Challenges and Mechanics. – 2015. – Vol. 45, No. 1. – P. 1-6.
31. Chong W. Design and wind tunnel testing of a Savonius wind turbine integrated with the omni-direction-guide-vane [Текст] / W. Chong, A. Fazlizan, S. Poh, K. Pan // World Renewable Energy Forum (WREF 2012) (august, 2012, Denver, USA). – 2012. – P. 1-7.
32. Chong W. T. Performance investigation of a power augmented vertical axis wind turbine for urban high-rise application [Текст] / W. T. Chong, K. C. Pan, S. C. Poh, A. Fazlizan, S. C. Oon, A. Badarudin, N. Nik-Ghazali // Renewable Energy. – 2013. – Vol. 51. – P. 388-397.
33. Chong W. T. Techno-economic analysis of a wind–solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application [Текст] / W. T. Chong, M. S. Naghavi, S. C. Poh, T. M. I. Mahlia, K. C. Pan // Applied Energy. – 2011. – Vol. 88. – P. 4067-4077.

34. Chong W. The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane [Текст] / W. Chong, A. Fazlizan, S. Poh, K. Pan, W. Hew, F. Hsiao // *Applied Energy*. – 2013. – Vol. 112. – P. 601-609.
35. Christopher I. Low cost automatic solar energy trapping system [Текст] / I. Christopher, R. Rameshand, C. Saravanan // *1st International Conference on Electrical Energy Systems*. – 2011. – P. 227-232.
36. Dalwadi P. Feasibility study of solar-wind hybrid power system [Текст] / P. Dalwadi, C. Mehta // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. – 2012. – Vol. 2, No. 3. – P. 125-128.
37. Danao L. An experimental investigation into the influence of unsteady wind on the performance of a vertical axis wind turbine [Текст] / L. Danao, O. Eboibi, R. Howell // *Applied Energy*. – 2013. – Vol. 107. – P. 403-411.
38. Dixit V. Analysis and design of a domestic solar-wind hybrid energy system for low wind speeds [Текст] / V. Dixit, J. Bhatia // *International Journal of Computer Applications*. – 2013. – Vol. 72, No. 22. – P. 40-44.
39. Dobrev I. Cfd and piv investigation of unsteady flow through Savonius wind turbine [Текст] / I. Dobrev, F. Massouh // *Energy Procedia*. – 2011. – Vol. 6. – P. 711-720.
40. Dokopoulos P. Prediction and evaluation of the performance of wind-diesel energy systems [Текст] / P. Dokopoulos, A. Saramourtsis, A. Bakirtzis // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 1996. – Vol. 11, No. 2. – P. 385-393.
41. Duffie J. A. Solar engineering of thermal processes [Текст] / J. A. Duffie, W. A. Beckman. – New York: A willey-interscience publication, 1980 – 469 p.
42. Dufo-Lopes R. Multi-objective design of pv – wind– diesel– hydrogen–battery systems [Текст] / R. Dufo-Lopez, J. L. Bernal-Agustin // *Renewable Energy*. – 2008. – Vol. 33. – P. 2559-2572.
43. Dufo-Lopez R. Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage [Текст] / R. Dufo-Lopez, J. L. Bernal-Agustin, J. Contreras // *Renewable Energy*. – 2007. – Vol. 32, No. 7. – P. 1102-1126.

44. Dursun E. Comparative evaluation of different power management strategies of stand-alone pv/wind/pemfc hybrid power system [Текст] / E. Dursun, O. Kilic // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2012. – Vol. 34. – P. 81-89.
45. Ekren B. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions [Текст] / B. Ekren, O. Ekren // *Applied Energy*. – 2009. – Vol. 86. – P. 1387-1394.
46. Ekren O. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing [Текст] / O. Ekren, B. Ekren // *Applied Energy*. – 2010. – Vol. 87. – P. 592-598.
47. Ekren O. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology [Текст] / O. Ekren, B. Ekren // *Applied Energy*. – 2008. – Vol. 85. – P. 1086-1101.
48. El-Sebaili A. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia [Текст] / A. El-Sebaili, F. Al-Hazmi, A. Al-Ghamdi, S. Yaghmour // *Applied Energy*. – 2010. – Vol. 87. – P. 568-576.
49. Eriksson S. Evaluation of different turbine concepts for wind power [Текст] / S. Eriksson, H. Bernhoff, M. Leijon // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2008. – Vol. 12. – P. 1419-1434.
50. Esham T. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques [Текст] / T. Esham, P. L. Chapman // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2007. – Vol. 22, No. 2 – P. 439-449.
51. Esham T. Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control [Текст] / T. Esham, J. W. Kimball, P. T. Krein, P. L. Chapman, P. Midya // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2006. – Vol. 21, No. 5 – P. 1282-1291.
52. Fahrzeug- und Windradaerodynamic – Windturbines [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://www.aia.rwth-aachen.de/vlueb/vl/fahrzeug-_und_windradaerodynamik/material/windkraftanlagen_english.pdf.

53. Fan Y. A new three-phase doubly salient permanent magnet machine for wind power generation [Текст] / Y. Fan, K. Chau, M. Cheng // IEEE Transactions On Industry Applications. – 2006. – Vol. 42, No. 1. – P. 53-60.
54. Fesli U. Design and implementation of a domestic solar-wind hybrid energy system [Текст] / U. Fesli, R. Bayir, M. Ozer // International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) (5–8 Nov. 2009, Bursa, Turkey). – 2009. – P. 29-33.
55. Fluent Manual – Ansys release version 14.5, Theory guide [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [https://Ansys/150/ANSYS Fluent Theory Guide](https://Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide).
56. Geurts B. Aerodynamic analysis of a vertical axis wind turbine in a diffuser [Текст] / B. Geurts, C. S. Ferreira, G. Bussel // 3rd EWEA Conference - Torque 2010: The Science of making torque from wind (28-30 June 2010, Heraklion, Crete, Greece). – 2010. – P. 1-7.
57. Goude A. Aerodynamic and electrical evaluation of a VAWT farm control system with passive rectifiers and mutual DC-bus [Текст] / A. Goude, F. Bulow // Renewable Energy. – 2008. – Vol. 60 – P. 284-292.
58. Goude A. Robust VAWT control system evaluation by coupled aerodynamic and electrical simulations [Текст] / A. Goude, F. Bulow // Renewable Energy. – 2013. – Vol. 59 – P. 193-201.
59. Gupta A. Modeling and simulation of doubly fed induction generator coupled with wind turbine-an overview [Текст] / A. Gupta, S. N. Singh, D. K. Khatod // Journal of Engineering, Computers and Applied Sciences. – 2013. – Vol. 2, No. 8. – P. 45-54.
60. Gupta A. Modelling of hybrid energy system Part II: Combined dispatch strategies and solution algorithm [Текст] / A. Gupta, R.P. Saini, M.P. Sharma // Renewable Energy. – 2011. – Vol. 36. – P. 466-473.
61. Hafez O. Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids [Текст] / O. Hafez, K. Bhattacharya // Renewable Energy. – 2012. – Vol. 45. – P. 7-15.

62. Hameed M. S. Design and analysis of a straight bladed vertical axis wind turbine blade using analytical and numerical techniques [Текст] / M. S. Hameed, S. K. Afaq // Ocean Engineering. – 2013. – Vol. 57. – P. 248-255.
63. Hassanzadehfard H. Optimal sizing of an islanded micro-grid for an area in north-west iran using particle swarm optimization based on reliability concept [Текст] / H. Hassanzadehfard, S. Moghaddas-Tafreshi, S. Hakimi // Photovoltaic Technology. – 2011. – P. 2969-2976.
64. Helle L. Wind turbine systems [Текст] / L. Helle, F. Blaabjerg // Control in Power Electronics. – Academic Press. – 2002. – P. 483-510.
65. Hernandez R. G. Modeling a wind turbine synchronous generator [Текст] / R. G. Hernandez, R. G. Ramirez // International Journal of Energy and Power. – 2013. – Vol. 2, No. 3. – P. 64-70.
66. Hua C. Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking [Текст] / C. Hua, J. Lin, C. Shen // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1998. – Vol. 45, No. 1 – P. 99-107.
67. Islam M. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines [Текст] / M. Islam, D. Ting, A. Fartaj // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2008. – Vol. 12. – P. 1087-1109.
68. Ismail E. Single-switch 3ϕ PWM low harmonic rectifiers [Текст] / E. Ismail, R. Erickson // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1996. – Vol. 11, No.2. – P. 338-346.
69. Ismail M. S. Design of an optimized photovoltaic and microturbine hybrid power system for a remote small community: Case study of Palestine [Текст] / M. S. Ismail, M. Moghavvemi, T. M. I. Mahlia // Energy Conversion and Management. – 2013. – Vol. 75. – P. 271-281.
70. Jaen C. On the use of sun trackers to improve maximum power point tracking controllers applied to photovoltaic systems [Текст] / C. Jaen, J. Pou, G. Capella, A. Arias and M. Lamich // Compability and Power Electronics (CPE '09) (20-22 May 2009, Badajoz, Portugal) – 2009. – P. 67-72.

71. Jahanbani F. Optimum design of a hybrid renewable energy system [Текст] / F. Jahanbani, G. Riahy // Renewable Energy – Trends and Applications. – 2011. – P. 232-250.
72. Jiao H. Design of automatic two-axis sun-tracking system [Текст] / H. Jiao, J. Fu, Y. Li, J. Lai // International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE) (26-28 June 2010, Wuhan, Malaysia). – 2010.– P. 2323-2326.
73. Kaabeche A. Techno-economic valuation and optimization of integrated photovoltaic/wind energy conversion system [Текст] / A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen // Solar Energy. – 2011. – Vol. 85. – P. 2407-2420.
74. Kamal E. An intelligent maximum power extraction algorithm for hybrid wind–diesel-storage system [Текст] / E. Kamal, M. Koutb, A. Sobaih, B. Abozalam // Electric Power and Energy Systems. – 2010. – Vol. 32. – P. 170-177.
75. Karaki S. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion system [Текст] / S. Karaki, R. Chedid, R. Ramadan // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1999. – Vol. 14, No. 3. – P. 766-772.
76. Karehar H. Reconfiguration of deregulated distribution network for minimizing energy supply cost by using multi-objective BGA [Текст] / H. Karegar, S. Jalilzadeh, V. Nabaei, A. Shabani // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. – 2008. – Vol. 2, No. 9. – P. 486-492.
77. Karki R. Reliability/cost implications of pv and wind energy utilization in small isolated power systems [Текст] / R. Karki, R. Billinton // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2001. – Vol. 16, No.4. – P. 368-373.
78. Kellogg W. Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/pv systems [Текст] / W. Kellogg, M. Nehrir, G. Venkataramanan, V. Gerez // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1998. – Vol. 13, No. 91. – P. 70-75.
79. Kelly N. Increasing the solar photovoltaic energy capture on sunny and cloudy days [Текст] / N. Kelly , T. Gibson // Solar Energy. – 2011. – Vol. 85. – P. 111-125.

80. Kishore R. A. Efficient direct-drive small-scale low-speed wind turbine [Текст] / R. A. Kishore, A. Marin, S. Priya // *Energy Harvesting and Systems*. – 2014. – Vol. 1, No. 1 – P. 27-43.
81. Koutroulis E. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms [Текст] / E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, K. Kalaitzakis // *Solar Energy*. – 2006. – Vol. 80. – P. 1072-1088.
82. Kubo K. Intelligent wind turbine unit with tandem rotors (discussion of prototype performances in field tests) [Текст] / K. Kubo, Y. Hano, H. Mitarai, K. Hirano, T. Kanemoto, A. M. Galal // *Current Applied Physics*. – 2010. – Vol. 10. – P. 326-331.
83. Kumar S. A hybrid model of solar-wind power generation system [Текст] / S. Kumar, V. Kumar // *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. – 2013. – Vol. 2, No. 8. – P. 4107-4116.
84. Lanzafame R. 2d cfd modeling of H-darrieus wind turbines using a transition turbulence model [Текст] / R. Lanzafame, S. Mauro, M. Messina // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol. 45. – P. 131-140. (приклад сітки, Vawt краще за Hawt).
85. Lari H. A. Analysis and design of a permanent-magnet outer-rotor synchronous generator for a direct-drive vertical-axis wind turbine [Текст] / H. A. Lari, A. Kiyoumars, B. M. Dehkordi, A. Darijani, S. M. Madani // *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. – 2008. – Vol. 10, No. 4 – P. 324-332.
86. Lee D. Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part 1: time-domain simulations [Текст] / D. Lee, L. Wang // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2008. – Vol. 23, No. 1. – P. 311-320.
87. Lee T. Wind-photovoltaic capacity coordination for a time-of-use rate industrial user [Текст] / T. Lee, C. Chen // *IET Renewable Power Generation*. – 2009. – Vol. 3, No. 2. – P. 152-167.
88. Li J. A simple sizing algorithm for stand-alone pv/wind/battery hybrid microgrids [Текст] / J. Li, W. Wei, J. Xiang // *Energies*. – 2012. – Vol. 5. – P. 5307-5323.

89. Li S. Numerical study on the performance effect of solidity on the straight-bladed vertical axis wind turbine [Текст] / S. Li, Y. Li, M. Leijon // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). – (28-31 March, 2010, Chengdu, China) – 2010. – P. 1-4.
90. Li Y. Visualization study on the static flow field around a straight-bladed vertical axis wind turbine [Текст] / Y. Li, K. Tagawa // Fourth International Conference on Experimental Mechanics. – (15 April, 2010, Chengdu, China) – 2010. – Vol. 7552. – P. 7.
91. Liu C. Design of a new outer-rotor permanent magnet hybrid machine for wind power generation [Текст] / C. Liu, K. Chau, J. Jiang, L. Jian // IEEE Transactions On Magnets. – 2008. – Vol. 44, No. 6, P. 1494-1497.
92. Makarchuk O. Optimization of the design of electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for VAWT [Текст] / O. Makarchuk, A. Rusek, I. Shchur, V. Klymko // Przegląd elektrotechniczny (Electrical review). – 2015. – Nr. 10. – P. 50–55.
93. Malael I. Numerical simulation of vawt flow using fluent [Текст] / I. Malael, H. Dumitrescu, M. Leijon // U.P.B. Sci. Bull. – 2014. – Vol. 76, No. 1 – P. 109-122.
94. Markvart T. Sizing of hybrid photovoltaic-wind energy systems [Текст] / T. Markvart // Solar Energy. – 1995. – Vol. 11, No. 4. – P. 277-281.
95. Mary G. Smart grid cost optimization using genetic algorithm [Текст] / G. Mary, R. Rajarajeswari // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 03, No. 07. – P. 282-287.
96. Masoum M. A. S. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage- and current-based maximum power-point tracking [Текст] / M. A. S. Masoum, H. Dehbonei, E. F. Fuchs // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2002. – Vol. 17, No. 4. – P. 514-522.
97. Melicio R. Fractional-order control and simulation of wind energy systems with PMSG/full-power converter topology [Текст] / R. Melicio, V. M. F. Mendes, J. P. S. Catalao // Energy Conversion and Management. – 2010. – Vol. 51 – P. 1250-1258.

98. Mellit A. Artificial intelligence techniques for sizing photovoltaic systems: A review [Текст] / A. Mellit, S. Kalogirou, L. Hontoria, S. Shaari // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol. 13. – P. 406-419.
99. Melo R. R. Integral analysis of rotors of a wind generator [Текст] / R. R. Melo, A. S. Neto // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16. – P. 4809-4817.
100. Mikati M. Electric grid dependence on the configuration of a small-scale wind and solar power hybrid system [Текст] / M. Mikati, M. Santos, C. Armenta // Renewable Energy. – 2013. – Vol. 57. – P. 587-593.
101. Mirecki A. Architecture complexity and energy efficiency of small wind turbines [Текст] / A. Mirecki, X. Roboam, F. Richardeau // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54, No.1, P. 660-669.
102. Modifications of VAWT concentrators – augmented wind turbines [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.google.com.ua/search?q=Augmented+VAWTs&newwindow=1&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAcQ_AUoAWoVChMI5eDb3KefyAIVxVksCh1k9AJY&biw=1280&bih=685.
103. Modifications of VAWTs – Types of Vawts [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.google.com/search?newwindow=1&biw=1280&bih=685&tbm=isch&sa=1&q=modifications+of+VAWT&oq=modifications+of+VAWT&gs_l=img.
104. Mohamed M. H. Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance [Текст] / M. H. Mohamed // Energy. – 2013. – Vol. 57. – P. 495-594.
105. Mollerstrom E. Noise propagation from a vertical axis wind turbine [Текст] / E. Mollerstrom, S. Larsson, F. Ottermo, J. Hylander, L. Baath // 43rd International Congress on Noise Control Engineering (16-19 November 2014, Melbourne, Australia). – 2014. – P. 1-8.
106. Mousal K. Design of a hybrid solar-wind power plant using optimization [Текст] / K. Mousa1, H. Alzubi, A. Diabat // Second International Conference on

- Engineering Systems Management and Its Applications (ICESMA) (30 Mar. – 1 Apr. 2010). – 2010.– P. 1-6.
107. Muller G. Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings [Текст] / G. Muller, M. F. Jentsch, E. Stoddart // *Renewable Energy*. – 2009. – Vol. 34. – P. 1407-1412.
108. NACA profile coordinates – Airfoil tools [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018>.
109. Nema P. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and pv-solar: A review [Текст] / P. Nema, R. Nema, S. Rangnekar // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2009. – No. 85. – P. 2096-2103.
110. Nobile R. Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: A two-dimensional study [Текст] / R. Nobile, M. Vahdati, J.F. Barlow, A. Mewburn-Crook // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2014. – Vol. 125. – P. 168-179.
111. Nowdeh S. Economic designing of pv/fc/wind hybrid system considering components availability [Текст] / S. Nowdeh, H. Mahdi // *I. J. Modern Education and Computer Science*. – 2013. – Vol. 7. – P. 69-77.
112. Nowdeh S. Optimal sizing of a stand-alone pv/fc/wind hybrid system using pso modified algorithm [Текст] / S. Nowdeh, M. Nasrollahnezhad, S. Khanabdal // *I. J. Modern Education and Computer Science*. – 2013. – Vol. 3, No. 3. – P. 12-19.
113. Patel K. A review about the straight-bladed vertical axis wind turbine (SB-vawt) and its performance [Текст] / K. Patel, Y. Sarthi, A. Tirkey, P. K. Sen // *International Journal for Innovative Research in Science and Technology*. – 2014. – Vol. 1, No. 6. – P. 46-51.
114. Pope K. Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine [Текст] / K. Pope, V. Rodrigues, R. Doyle, A. Tsopelas, R. Gravelsins, G. F. Naterer, E. Tsang // *Renewable Energy*. – 2010. – Vol. 35. – P. 1043-1051.
115. Prasad A. An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers [Текст] / A. Prasad, P. Ziogas, S. Manias // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 1991. – Vol. 6, No.1, P. 83-92.

116. Prasad S. N. Analysis of aerofoil blade using ANSYS for a vehicle mounted micro wind turbine [Текст] / S. N. Prasad, S. S. Rao, V. Mohan // Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE) (2-4 July, 2008, London, U.K.) – 2008. – Vol. 2. – P. 4.
117. Radosavljevic J. Defining of the intensity of solar radiation on horizontal and oblique surfaces on earth [Текст] / J. Radosavljevic, A. Dordevic // Working and Living Environmental Protection. – 2001. – Vol. 2, No. 1. – P. 77-86.
118. Ramoji S. Optimization of hybrid pv/wind energy system using genetic algorithm (GA) [Текст] / S. Ramoji, B. Rath, D. Kumar // International journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – Vol. 4, No. 1. – P. 29-37.
119. Rassoulinejad-Mousavi S. M. Experimental study of a combined three bucket H-rotor with savonius wind turbine [Текст] / S. M. Rassoulinejad-Mousavi, M. Jamil, M. Layeghi // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Vol. 28, No. 2. – P. 205-211.
120. Rekioua D. Optimization of photovoltaic power systems. Modelization, simulation and control [Текст] / D. Rekioua, E. Matagne. – London: Springer-Verlag, 2012 – 275 p.
121. Renewable energy sources and climate change mitigation – Special report of the intergovernmental panel on climate change [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [http://srren.ipcc-wg3.de/report /IPCC_SRREN_Full_Report.pdf](http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Full_Report.pdf).
122. Renewables 2014 Global Status Report – REN 21 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://www.ren21.net /Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf.
123. Revankar P. Maximum power point tracking for pv systems using matlab/simulink [Текст] / P. Revankar, W. Gandhare and A. Thosar // Second International Conference on Machine Learning and Computing. – 2010. – P. 8-11.
124. Roy S. Unsteady simulation of a vertical axis wind turbine [Текст] / S. Roy, K. Biswakarma, U. K. Saha // International Journal of Innovative Research and Development. – 2012. – Vol. 1, No. 7. – P. 111-117.

125. Rus L. F. Experimental study on the increase of the efficiency of vertical axis wind turbines by equipping them with wind concentrators [Текст] / L. F. Rus // Journal of Sustainable Energy. – 2012. – Vol. 3, No. 1. – P. 30-35.
126. S. Sadyrbayev. Design and research of dual-axis solar tracking system in condition of town almaty [Текст] / S. Sadyrbayev, A. Bekbayev, S. Orlynbayev and Z. Kaliyev // Middle-East Journal of Scientific Research. – 2013. – Vol. 17, No. 12. – P. 1747-1751.
127. Saeidi D. Aerodynamic design and economical evaluation of site specific small vertical axis wind turbines [Текст] / D. Saeidi, A. Sedaghat, P. Alamdari, A. Alemrajabi // Applied Energy. – 2013. – Vol. 101. – P. 765-775.
128. Sareni B. Model simplification and optimization of a passive wind turbine generator [Текст] / B. Sareni, A. Abdelli, X. Roboam, D. H. Tran // Renewable Energy. – 2009. – Vol. 34 – P. 2640-2650.
129. Sefa I. Application of one-axis sun tracking system [Текст] / I. Sefa, M. Demirtas, I. Colak // Energy Conversion and Management. – 2009. – Vol. 50. – P. 2709-2718.
130. Sharaf A. A novel multi-loop fuzzy logic dynamic controller for wind/photovoltaic-grid interface dc energy utilization farm [Текст] / A. Sharaf, I. Altas, E. Ozkop // International Conference on Renewable Energies and Power Quality. – 2009. – P. 6.
131. Sharma K. K. Performance measurement of a three-bladed combined darrieus [Текст] / K. K. Sharma, A. Biswas, R. Gupta // International Journal of Renewable Energy Research. – 2013. – Vol. 3, No. 4. – P. 885-891.
132. Shchur I. Analysis of methods of electrical load of permanent magnet synchronous generator for small wind turbines [Текст] / I. Shchur, A. Rusek, V. Klymko, A. Gastolek, J. Sosnowski // Maszyny elektryczne: Zeszyty Problemowe. – 2015. – № 1 (105).– P. 75–81.
133. Shchur I. Energy-shaping optimal load control of PMSG in a stand-alone wind turbine as a port-controlled Hamiltonian system [Текст] / I. Shchur, A. Rusek, Y. Biletskyi // Przegląd Elektrotechniczny. – 2014. – Nr. 5. – P. 50-55.

134. Shchur I. Estimation of electromagnetic compatibility and efficiency of the adjustable load systems of PMSG in wind turbines [Текст] / I. Shchur // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2011. – No. 1. – P. 85-90.
135. Shchur I. Multi control active rectifier in the local wind energy system with a vertical axis of rotation [Текст] / I. Shchur, O. Turlenko // Problems of Automatic Electric Drive. Theory and Application. – 2008. – No. 30. – P. 418-420.
136. Shigetomi A. Interactive flow field around two Savonius turbines [Текст] / A. Shigetomi, Y. Murai, Y. Tasaka, Y. Takeda // Renewable Energy. – 2011. – Vol. 36. – P. 536-545.
137. Singh M. A. Investigation of self-starting and high rotor solidity on the performance of a three S1210 blade H-type Darrieus rotor [Текст] / M. A. Singh, A. Biswas, R. D. Misra // Renewable Energy. – 2015. – Vol. 76. – P. 381-387.
138. Sirasani K. Solar wind hydro hybrid energy system simulation [Текст] / K. Sirasani, S. Kamdi // International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE). – 2013. – Vol. 2, No. 6. – P. 500-503.
139. Sreeraj E. S. Design of isolated renewable hybrid power systems [Текст] / E. Sreeraj, K. Chatterjee, S. Bandyopadhyay // Solar Energy. – 2010. – Vol. 84. – P. 1124-1136.
140. Sun F. Feasibility study of one axis three positions tracking solar PV with low concentration ratio reflector [Текст] / B. Huang, F. Sun // Energy Conversion and Management. – 2007. – Vol. 48. – P. 1273-1280.
141. Sungur C. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey [Текст] / C. Sungur // Solar Energy. – 2009. – Vol. 34. – P. 1119-1125.
142. Takao M. A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row. Effect of guide vane geometry on the performance [Текст] / M. Takao, H. Kuma, T. Maeda, Y. Kamada, M. Oki, A. Minoda // Journal of Thermal Science. – 2009. – Vol. 18, No. 1 – P. 54-57.

143. Tapia A. Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator [Текст] / A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, J. R. Saenz // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2003. – Vol. 18, No. 2. – P. 194-204.
144. The design and testing of airfoils for application in small vertical axis wind turbines – Master of Science Thesis [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://www.lr.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen_en_Leerstoelen/Afdeling_AEWE/Aerodynamics/Contributor_Area/Secretary/M._Sc._theses/doc/2006_1_17.pdf.
145. Tirkey A. Study on the effect of blade profile, number of blade, Reynolds number, aspect ratio on the performance of vertical axis wind turbine [Текст] / A. Tirkey, Y. Sarthi, K. Patel, R. Sharma, P. K. Sen // International Journal of Science, Engineering and Technology Research. – 2014. – Vol. 5, No. 12. – P. 3183-3187.
146. Tong C. Innovative power-augmentation-guide-vane design of wind-solar hybrid renewable energy harvester for urban high rise application [Текст] / C. Tong, M. Z. Zainon, P. S. Chew, S. K. Cui, W. S. Keong, P. K. Chen // AIP Conference Proceedings (21 -23 august, 2009, Kuala-Lumpur, Malaysia). – 2009. – Vol. 1225, No. 1. – P. 507-521.
147. Trapp J. G. Variable speed wind turbine using the squirrel cage induction generator with reduced converter power rating for stand-alone energy systems [Текст] / J. G. Trapp, F. A. Farret, F. T. Fernandes, L. C. Correa // 10th International Conference on Industry Applications (5-7 November 2012, Fortaleza, Brazil). – 2012. – P. 1-8.
148. Urtasun A. Modeling of small wind turbines based on PMSG with diode bridge for sensorless maximum power tracking [Текст] / A. Urtasun, P. Sanchis, I. S. Martin, J. Lopez, L. Marroyo // Renewable Energy. – 2013. – Vol. 55 – P. 138-149.
149. Vosen S. Hybrid energy storage systems for stand-alone electric power systems: optimization of system performance and cost through control strategies [Текст] / S. Vosen, J. Keller // International Journal of Hydrogen energy. – 1999. – Vol. 24. – P. 1139-1156.

150. Wang C. Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system/ C. Wang, M. Nehrir // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2008. – Vol. 23, No. 3. – P. 957-967.
151. Wang S. Numerical investigations on dynamic stall of low Reynolds number flow around oscillating airfoils [Текст] / S. Wang, D. B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, Z. Tao // *Computers and Fluids*. – 2010. – Vol. 39. – P. 1529 – 1541.
152. Wang Y.-F. Guide blades feasibility evaluation and its contribution to performance of a micro-wind turbine resembling lotus in shape [Текст] / Y.-F. Wang, M.-S. Zhan // *Energy and Buildings*. – 2014. – Vol. 82. – P. 709-718.
153. Wekesa D. A numerical analysis of unsteady inflow wind for site specific vertical axis wind turbine: A case study for Marsabit and Garissa in Kenya [Текст] / D. Wekesa, C. Wang, Y. Wei, J. Kamau, L. Danao // *Renewable Energy*. – 2015. – Vol. 76. – P. 648-661.
154. Wekesa D. W. Influence of operating conditions on unsteady wind performance of vertical axis wind turbines operating within a fluctuating free-stream: A numerical study [Текст] / D. W. Wekesa, C. Wang, Y. Wei, L. A. Danao // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2014. – Vol. 135. – P. 76-89.
155. Wu W. Scenario-oriented design of an MFC/PV/Battery based hybrid power generation system [Текст] / W. Wu, C.-Y. Wang, J.-J. Hwang // *Electric Power and Energy Systems*. – 2015. – Vol. 65. – P. 34-40.
156. Yanine F. F. Review of grid-tie micro-generation systems without energy storage: Towards a new approach to sustainable hybrid energy systems linked to energy efficiency [Текст] / F. F. Yanine, E. E. Sauma // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 26. – P. 60-95.
157. Yao Y. X. Design based on a parametric analysis of a drag driven vawt with a tower cowling [Текст] / Y. X. Yao, Z. P. Tang, X. W. Wang // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2013. – Vol. 116. – P. 32-39.

158. Zhou W. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems [Текст] / W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, H. Yang // Applied Energy. – 2010. – Vol. 87. – P. 380-389.
159. Бринкворт Б. Д. Солнечная энергия для человека [Текст] / Б. Д. Бринкворт; Пер. с англ. – Москва: Мир, 1976 – 291 с.
160. Бураков М. В. Генетический алгоритм: теория и практика [Текст] / М. В. Бураков. – СПб.: ГУАП, 2008. – 164 с.
161. Горелов Д. Н. Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения [Текст] / Д. Н. Горелов. – Омск: Полиграфический центр КАН, 2012. – 68 с.
162. Закон України про електроенергетику – Верховна рада України, Законодавство [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/main/575/97-%D0%B2%D1%80>.
163. Климко В. Алгоритм роботи комбінованої автономно-мережевої системи електроживлення окремого об'єкта [Текст] / В. Климко // Енергетика та системи керування. Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2013 (21-23 листопада, 2013 р., м. Львів). – 2013. – С. 84–86.
164. Климко В. И. Условия эффективной работы фотоэлектрических панелей. Опыт г. Львова [Текст] // В. И. Климко, И. З. Щур // Энергетика и ТЭК. – 2014. – № 11. – С. 42–45.
165. Климко В. І. Інтелектуальна система керування електропостачанням окремого об'єкта від мережі та поновлюваних джерел енергії [Текст] / В. І. Климко, І. З. Щур // Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених (25-26 жовтня, 2012 р., м. Київ). – 2012. – С. 25-26.
166. Кондратьев К. Я. Радиационный режим наклонных поверхностей [Текст] / К. Я. Кондратьев, З. И. Пивоварова, М. П. Федорова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. – 170 с.
167. Лисенко Л. Фактори впливу на ефективність сонячних колекторів та фотоелектричних панелей у Харківській області [Текст] / Л. Лисенко, К.

- Махотіло, Д. Косатий // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 59 (1032). – С. 101-112.
168. Мороз В. І. Система відслідковування точки відбору максимальної потужності від сонячної батареї [Текст] / В. І. Мороз, О. В. Турич, В. Б. Козій // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2013. – № 1, 14 – с. 197-199.
169. Облікова ставка Національного банку України – Грошово-кредитна та фінансова статистика [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.bank.gov.ua/control/uk/publish/article?art_id=5364.
170. Патент на винахід UA 105743 C2, МПК F03D 9/02, H05B 6/10. Вітрова теплоелектростанція [Текст] / І. З. Щур, О. В. Макачук, В. І. Щур, В. І. Климко; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». – № а201308843, заяв. 15.07.2013; оп. 10.01.2014, Бюл. № 1.
171. Патент на корисну модель МПК F03D 3/00, F03D 11/00, H01L 31/042. Вітросонячна електростанція [Текст] / І. З. Щур, В. І. Климко; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». – № u201413997, заявл. 26.12.2014; отримано рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель 06.08.2015.
172. Постанова НКРЕКП – Про встановлення «зелених» тарифів на електроенергію [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.nerc.gov.ua/?id=17019>.
173. Постанова НКРЕКП – Про встановлення тарифів на електроенергію, що відпускається населенню [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0231-15>.
174. Рифкин Д. Третья промышленная революция: Как горизонтальные взаимодействия меняют энергетику, экономику и мир в целом [Текст] / Д. Рифкин; Пер. с англ. – Москва: Альпина нон-фикшн, 2014. – 410 с.
175. Рожкова Л. Г. Концентратори вихрових потоків вертикально-осьових вітроустановок для підвищення коефіцієнта використання енергії вітру

- [Текст] / Л. Г. Рожкова, С. П. Кулініч // Восточно-Европейский Журнал Передовых Технологий. – 2012. – Том 5, № 59. – С. 20-23.
176. Твайделл Д. Возобновляемые источники энергии [Текст] / Д. Твайделл, А. Уэйр; Пер. С англ. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
177. Финансовый квартал Минфин – Индекс інфляції [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://index.minfin.com.ua/index/infl/>.
178. Фреїк Д. Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання. Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку (огляд) [Текст] / Д. Фреїк, В. Чобанюк, М. Галушак, О. Криницький, Г. Матеїк // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – Вип. 13, №. 1. – С. 7-20.
179. Технічні характеристики фотоелектричних панелей – Каталогова інформація [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.posharp.com/sm-55-solar-panel-from-shell-solar_p779368318d.aspx.
180. Ціни на акумуляторні батареї – Каталогова інформація [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.cocoon.gr/batteries-sunlight_eng.html.
181. Ціни на вертикальні вітрогенератори – Каталогова інформація [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://ecost.lviv.ua/ua/generators.htm>.
182. Ціни на сонячні панелі – Каталогова інформація [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.ecosvit.net/ua/solar-modules-altek>.
183. Шаповал С. Розрахунок сонячної енергії, що надходить на геліопанель [Текст] / С. Шаповал, М. Касинець, О. Дейнека // Вісник національного університету “Львівська політехніка”. – 2012. – № 742. – С. 225-228.
184. Шефтер Я. И. Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты [Текст] / Я. И. Шефтер, И. В. Рождественский. – Москва: Колос, 1967. – 189 с.
185. Шефтер Я. И. Использование энергии ветра [Текст] / Я.И.Шефтер. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.
186. Щур І. З. Енергетична ефективність різних способів відбору потужності від синхронного генератора з постійними магнітами у вітроенергоустановці [Текст] / І. З. Щур, О. Р. Турленко // Електроенергетичні та електромеханічні

- системи. Вісн. Націон. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2009. – № 654. – С. 272–277.
187. Щур І. З. Методика розрахунку показників електропостачання окремого об’єкта від гібридної вітро-сонячної системи [Текст] / І. З. Щур, В. І. Климко // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. Кременчук: КрНУ. – 2014. – Вип. 1/2014 (2). – С. 83–85.
188. Щур І. З. Оптимальне керування вітроустановками різної потужності в умовах турбулентних вітрів [Текст] / І. З. Щур, В. І. Щур // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісн. Націон. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2012. – № 736. – С. 146–152.
189. Щур І. З. Прогнозування ефективності роботи фотоелектричних панелей у місті Львові [Текст] / І. З. Щур, В. І. Климко // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісн. Націон. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2014. – № 785. – С. 88–94.
190. Щур І. З. Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітро-сонячної системи для електропостачання окремого об’єкта [Текст] / І. З. Щур, В. І. Климко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – Вип. 2. – С. 92–100.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Номінальні параметри досліджуваних ВЕУ з ВВО та ФЕП

Таблиця А1

Номінальні параметри ВЕУ з ВВО [181]

Назва ВЕУ з ВВО	Eurowind VS-002 200 W
Тип генератора	СГПМ
Номінальна потужність $P_{\text{ВЕУ}}$, Вт	200
Вихідна напруга U , В	12
Тип вітроротора	H-rotor
Радіус ВР R , м	0,8
Висота лопаті ВР $H_{\text{ВР}}$, м	1,5
Кількість лопатей ВР	5
Стартова швидкість вітру $V_{\text{В вріз}}$, м/с	2
Номінальна швидкість вітру $V_{\text{В ном}}$, м/с	10
Максимальна швидкість вітру $V_{\text{В виріз}}$, м/с	40

**Номінальні параметри ФЕП [179] (за стандартних умов вимірювання:
 СР – 1000 Вт/м², швидкість вітру – 1 м/с, температура модуля – 25° С)**

Назва ФЕП	Shell SM55
Тип фотоелементів	Монокристалічний кремній
Номінальна потужність $P_{\text{ФЕП}}$, Вт	55
Напруга в точці відбору максимальної потужності $U_{\text{ТВМП}}$, В	17,4
Струм в точці відбору максимальної потужності $I_{\text{ТВМП}}$, А	3,16
Напруга холостого ходу $U_{\text{н.х.}}$, В	21,7
Струм короткого замикання $I_{\text{к.з.}}$, А	3,45
Номінальна робоча температура модуля $\theta_{\text{НОМ}}$, °С	43
Коефіцієнт корисної дії ФЕП $\eta_{\text{ФЕП}}$, %	14
Температурний коефіцієнт напруги неробочого ходу ФЕП $k_{\text{н}}$, мВ/°С	-76
Температурний коефіцієнт струму короткого замикання ФЕП $k_{\text{і}}$, мА/°С	1,4
Довжина ФЕП l , мм	1293
Ширина ФЕП w , мм	329

ДОДАТОК Б

Програма розрахунку балансу перетоків ЕЕ між вузлами
у автономно-мережевій ВССЕ

```

%date import - отримання інформації з бази даних
un=load('Input parameters.mat', 'Br', 'Cl', 'Hnum', 'Hs', ...
        'Load', 'N', 'Temp', 'Vel');
Br=un.Br;
Cl=un.Cl;
Hnum=un.Hnum;
Hs=un.Hs;
Load=un.Load;
N=un.N;
Temp=un.Temp;
Vel=un.Vel;
% Вхідні параметри
% Hnum - річний номер години;
% Hs - година дня;
% Load - погодинне навантаження;
% Temp - температура навк. серед.;
% Vel - швидкість вітру, м/с;
% N - порядковий номер дня року;
%Алгоритм розрахунку кількості ЕЕ згенерованої від сонця
phi=49; %Широта місцевості в градусах
phi=phi*pi/180; %Широта місцевості в радіанах
hamah=0; %Азимут панелі в градусах (панель обернена на південь)
hama=hama*pi/180; %Азимут панелі в радіанах
x0=35; %Кут нахилу панелі в градусах
alfa=x0*pi/180; %Кут нахилу панелі в радіанах
%Розрахунок часового кута w
w=(pi/12).*(Hs-12);
%Розрахунок схилення сонця
delta=23.45.*(pi/180)*sin((2*pi/365)*(284+N));
%Розрахунок theta - кута між напрямом на сонце з точки розміщення ФЕП та
%нормаллю до неї
A=sin(phi)*cos(alfa);
B=cos(phi)*sin(alfa)*cos(hama);
C=sin(alfa)*sin(hama);
D=cos(phi)*cos(alfa);
E=sin(phi)*sin(alfa)*cos(hama);
costheta=(A-B).*sin(delta)+(C.*sin(w)+(D+E).*cos(w)).*cos(delta);
theta=acos(costheta);
%Розрахунок кута висоти сонця
sinh=sin(phi).*sin(delta)+cos(phi).*cos(delta).*cos(w);
h=asin(sinh);
%Панель обернена на південь
%Розрахунок притоку прямої сонячної радіації Sp
for i=1:1:8760
    if cos(theta(i,1))>=0
Sp(i,1)=(1085.46-
194.1*(1/sin(h(i,1)))+11.36*(1/sin(h(i,1))^2))*Br(i,1)*cos(theta(i,1));
    else
        Sp(i,1)=0;
    end;
%Розрахунок притоку розсіяної сонячної радіації Sr
if sin(h(i,1))>0.1
Sr(i,1)=(137.1-28.82*(1/sin(h(i,1)))+2.27*(1/sin(h(i,1))^2))*Cl(i,1);
else
    Sr(i,1)=0;
end;
%Розрахунок притоку сумарної сонячної радіації Ssum

```

```

Ssym(i,1)=Sp(i,1)+Sr(i,1);
end;
%-----
% Характеристики сонячної панелі -
NOCT = 43; %Nominal cell operating temperature, C;
KKD = 0.14; % Коефіцієнт корисної дії панелі;
m = 0.005; % Температурний коефіцієнт панелі, за 1 C;
% Розрахунок реальної температури панелі:
Treal = Temp+( (NOCT-20)/800).*Ssym;
% Розрахунок миттєвого ККД:
KKD1 = KKD.*(1-m.*(Treal-25));
% Кількість отриманої ЕЕ на виході з ФЕП з одного м^2 -
Erv = KKD1.*Ssym*1 ;
%Алгоритм розрахунку кількості ЕЕ згенерованої від вітру
% Характеристики вітрогенератора з ВВО -
Cp = 0.351;
rho = 1.29; % кг/м^3
shoroh=1/7;%Коефіцієнт шороховатості поверхні
H0=10; %Висота встановлення анемометра;
H=10; %Висота вітряка
% Кількість отриманої ЕЕ на виході з вітрогенератора з одного м^2 -
Ewt = 0.5*rho*Cp.*(Vel.^3)*1 ;
%Ewt = 0.5*rho*Cp.*(((H/H0)^shoroh)*Vel).^3)*1 ;
% Кількість отриманої ЕЕ на виході з вітрогенератора + ФЕП -
Esyms = Erv+ Ewt ;
%Тарифи та обмеження по тарифах
tarif1=0.9; % грн./кВт*год.
tarif2=tarif1*1.68/0.9;% грн./кВт*год.
tarifgreen=3.50; % грн./кВт*год.
%Неопалювальний сезон
limitn=100; %кВт*год.
%Опалювальний сезон
limito=3000;%кВт*год.
% Курс долара
dol=23;
%Коефіцієнт, який враховує повернення державою коштів за купівлю "зелених"
%технологій
k=1.0; %Коефіцієнт, що враховує кошти, які держава може повернути
%за використання зелених технологій
k1=0.6; %Коефіцієнт генерування ЕЕ від ПДЕ
% Потужність ФЕП, Вт;
for i1=1:1:150
x1(i1,1)=i1*100;
% Потужність вітряка, Вт;
for i2=1:1:150
x2(i2,1)=i2*100;
% Ціна фотопанелі за Вт
P1(i1,1) = 0.00004*(x1(i1,1))^2-0.0144*(x1(i1,1))-...
+2.3024;
%P1=1.55*k;
% Ціна за обслуговування фотопанелі за Вт $/рік
M1(i1,1)=0.01*P1(i1,1);
%M1=0.01*P1;
% Ціна вітряка за Вт
P2(i2,1)= 0.000000002*(x2(i2,1))^2-0.000002*(x2(i2,1))+1.7423;
%P2=1.55*k;
%Pv2=4.97*k;
% Ціна за обслуговування вітряка за Вт $/рік
M2(i2,1)= 0.01*P2(i2,1);
%M2=0.01*P2;

% Характеристики акумуляторної батареї -
DOD = 0.5; % Depth of discharge
KKDroz = 0.93; % ККД розряду батареї

```



```

KKDzar = 0.744; % ККД заряду батареї
Nb = 19;      % Кількість послідовно з'єднаних акумуляторів
V = 12;      % номінальна напруга на затискачах акумулятора
Vsym = Nb*V; % номінальна напруга на затискачах всіх акумуляторів
% Номінальна ємність акумулятора, A*год.
x3 = 100;
% Ціна акумулятора а а*год
P3=-0.000002*x3^2 - 0.0013*x3+1.6647;
%P3=1.56;
% Ціна за обслуговування батареї за A*год $/рік
M3=0.01*P3;
% Кількість замін батареї за 20 років
N1=1;
Ebatmax = Vsym*x3;
Ebatmin = (1-DOD)*Ebatmax;
c = 0.05; % Для заряду акумулятора
I = c*x3; % Струм заряду акумулятора
dSOCmax = I*Vsym*1;
SOCstart = (Ebatmax+Ebatmin)/2;
% Ціна інвертора за Вт вст. потужності
P4=0.12*k;
% Ціна за обслуговування інвертора
M4=0.01*P4;
% Ціна контролера (за пристрій)
P5=100;
% Ціна за обслуговування контролера
M5=0.01*P5;
%Строк роботи системи
lifetime=20;
%Час, за який відбудеться заміна батарей
lifetime10=10;
%Інфляція
inflation=0.1;
%Ставка дисконтування
discont=0.095;
% Характеристики мережі -
x4 = 0.9; % Ніч
x5 = 0.7; % День
%Розрахунок отриманої ЕЕ від сонця і вітру відповідно до вибраної
%потужності
Esum = (Ewt.*(x2(i2,1))/195)+(Erv.*(x1(i1,1))/140) ;
%Перевірка
%Esum = (Ewt*1950/195)+(Erv*1140/140) ;
% Встановлення часу доби та присвоєння значення до якого має заряджатися
%АБ, відповідно до дня чи ночі;
for i=1:1:8760
    if (Hs(i,1)>=7 && Hs(i,1)<=23)
        DN(i,1)=x5;
    else
        DN(i,1)=x4;
    end;
end;
% Розрахунок dSOCstatic(dSOCs)
%(встановлення нічного/денного тарифу на ЕЕ);
for i=1:1:8760
    if DN(i,1)== x4
        dSOCs(i,1)=(Ebatmax-Ebatmin)*x4;
        tariff2(i,1)=tarif2/2;
        tariff1(i,1)=tarif1/2;
    else
        dSOCs(i,1)=(Ebatmax-Ebatmin)*x5;
        tariff2(i,1)=tarif2;
        tariff1(i,1)=tarif1;
    end;
end;

```

```

end;
% Розрахунок dSOCdynamic(dSOCd);
j=1;
%Nullification
for i=1:1:8760
    SOC(i,1)= 0;
    Edump(i,1)= 0;
    Enetwork(i,1)=0;
    dSOCd(i,1)=0;
%networkcost(i,1) = 0;
end;
%Innitional values
%SOCstart=SOCstart;
SOC(1,1)= SOCstart;
dSOCd(1,1)= 0;
%dSOCmax=dSOCmax;
% Розрахунок SOC (Eb), Edump;
%Алгоритм роботи ВССЕ
for i=2:1:8760
    O(i,j)=KKDzar*(Esym(i,j)-Load(i,j));
    Enetwork(i,1) = 0;
    %networkcost(i,1) = 0;
    Edump(i,1) = 0;
    if Esym(i,1)>=Load(i,1)
        dSOCd(i,1)= 0;
        if SOC(i-1,j)<Ebatmax
            if (SOC(i-1,j)+KKDzar*(Esym(i,j)-Load(i,j)))>=Ebatmax
                SOC(i,j)=Ebatmax;
                Edump(i,j)= (Esym(i,j)-Load(i,j))-(Ebatmax-SOC(i-1,j))/KKDzar;

                kontur(i,j)=1;
            else
                SOC(i,j)=SOC(i-1,j)+ KKDzar*(Esym(i,j)-Load(i,j));
                kontur(i,j)=2;
            end;
        else
            SOC(i,j)=SOC(i-1,j);
            Edump(i,j)= Esym(i,j)-Load(i,j);
            kontur(i,j)=3;
        end;
    else
        if SOC(i-1,j)> Ebatmin + dSOCd(i-1,j)
            dSOCd(i,1)=0;
            if SOC(i-1,j)-(Load(i,j)-Esym(i,j))/KKDroz> Ebatmin
                SOC(i,j)= SOC(i-1,j)-(Load(i,j)-Esym(i,j))/KKDroz;
            else
                SOC(i,j)= Ebatmin;
                Enetwork(i,1) = -((SOC(i-1,j)-Ebatmin)/KKDroz)...
                    - (Load(i,1)-Esym(i,1)));
                kontur(i,j)=5;
            end;
        else
            dSOCd(i,1)=(Ebatmax-Ebatmin)*DN(i,1);
            SOC(i,j)= SOC(i-1,j)+dSOCmax/KKDzar;
            Enetwork(i,1) = dSOCmax + Load(i,1)-Esym(i,1);
            % networkcost(i,1) = Enetwork(i,1).*tariff(i,1)/1000;
            kontur(i,j)=4;
        end;
    end;

end;

end;
% Розрахунок вартості ЕЕ, що споживається з мережі
sumjan=0;

```

```

sumfeb=0;
summar=0;
sumapr=0;
summay=0;
sumjun=0;
sumjul=0;
sumaug=0;
sumsep=0;
sumoct=0;
sumnov=0;
sumdec=0;
networkcost=0;
sumEsym=0;

for i=1:1:8760
    sumEsym = sumEsym+Esym(i,j);

    if i<=744
        if sumjan<=limito
            sumjan=sumjan+Enetwork(i,1);
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);
        else
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
        end;
    elseif i<=1416

        if sumfeb<=limito
            sumfeb=sumfeb+Enetwork(i,1);
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);
        else
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
        end;
    elseif i<=2160
        if summar<=limito
            summar=summar+Enetwork(i,1);
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);
        else
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
        end;
    elseif i<=2880
        if sumapr<=limito
            sumapr=sumapr+Enetwork(i,1);
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);
        else
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
        end;
    elseif i<=3624
        if summay<=limitn
            summay=summay+Enetwork(i,1);
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);
        else
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
        end;
    elseif i<=4344
        if sumjun<=limitn
            sumjun=sumjun+Enetwork(i,1);
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);
        else
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
        end;
    elseif i<=5088
        if sumjul<=limitn
            sumjul=sumjul+Enetwork(i,1);
            networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);

```

```

else
    networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
end;
elseif i<=5832
    if sumaug<=limitn
        sumaug=sumaug+Enetwork(i,1);
        networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);
    else
        networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
    end;
elseif i<=6552
    if sumsep<=limitn
        sumsep=sumsep+Enetwork(i,1);
        networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);
    else
        networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
    end;
elseif i<=7296
    if sumoct<=limito
        sumoct=sumoct+Enetwork(i,1);
        networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);
    else
        networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
    end;
elseif i<=8016
    if sumnov<=limito
        sumnov=sumnov+Enetwork(i,1);
        networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);
    else
        networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
    end;
elseif i<=8760
    if sumdec<=limito
        sumdec=sumdec+Enetwork(i,1);
        networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff1(i,1);
    else
        networkcost=networkcost+Enetwork(i,1)*tariff2(i,1);
    end;
end;
end;
end;

%Розрахунок критерію енергоефективності COS
%Розрахунок змінної Xa
Xa=(1+inflation)/(1+discont);
%Розрахунок CPWF, який заледить від рівня інфляції та ставки дисконтування
CPWF=(1-Xa^lifetime)/(1-Xa);
%Розрахунок Pab - ціни за акумуляторну батарею через певну кількість років
Pab=(Xa^lifetime10)*x3*Nb*(P3+10*M3);
%Розрахунок TLCC - total life cycle cost
TLCC(i1,i2)=x1(i1,1)*(P1(i1,1)+20*M1(i1,1))+x2(i2,1)*(P2(i2,1)+20*M2(i2,1))...
+x3*Nb*(P3+20*M3)+Pab+((x1(i1,1)+x2(i2,1))*(P4+20*M4))+(P5+20*M5);
%Розрахунок ТАС - загальної річної вартості системи
ТАС=TLCC./CPWF;
%Розрахунок COS - ціни системи
COS(i1,i2)=(ТАС(i1,i2))+networkcost*0.001/dol;
REPG(i1,i2)=sum(Edump)/sum(Load);
netw(i1,i2)=networkcost*0.001/dol;
%sum(ESym)<0.5*sum(Load)&&
COST100(i1,i2)=((x1(i1,1)*(P1(i1,1)+20*M1(i1,1))+x2(i2,1)...
*(P2(i2,1)+20*M2(i2,1))+x3*Nb*(P3+N1*P3+(20-N1-1)*M3)+...
+P5+20*M5)/20)+networkcost*0.001/dol;
end;
end;
end;

```

ДОДАТОК В

Координати профілю НАСА 0018

Таблиця В1

Відносні координати профілю НАСА 0018 [108]

х/с, в.о.	у/с, в.о.	z/с, в.о.
1,0000	0,00189	0
0,9500	0,0121	0
0,9000	0,02172	0
0,8000	0,03935	0
0,7000	0,05496	0
0,6000	0,06845	0
0,5000	0,07941	0
0,4000	0,08705	0
0,3000	0,09003	0
0,2500	0,08912	0
0,2000	0,08606	0
0,1500	0,08018	0
0,1000	0,07024	0
0,0750	0,063	0
0,0500	0,05332	0
0,0250	0,03922	0
0,0125	0,02841	0
0,0000	0	0
0,0125	-0,02841	0
0,0250	-0,03922	0
0,0500	-0,05332	0
0,0750	-0,063	0
0,1000	-0,07024	0
0,1500	-0,08018	0
0,2000	-0,08606	0
0,2500	-0,08912	0
0,3000	-0,09003	0
0,4000	-0,08705	0
0,5000	-0,07941	0
0,6000	-0,06845	0
0,7000	-0,05496	0
0,8000	-0,03935	0
0,9000	-0,02172	0
0,9500	-0,0121	0
1,0000	-0,00189	0

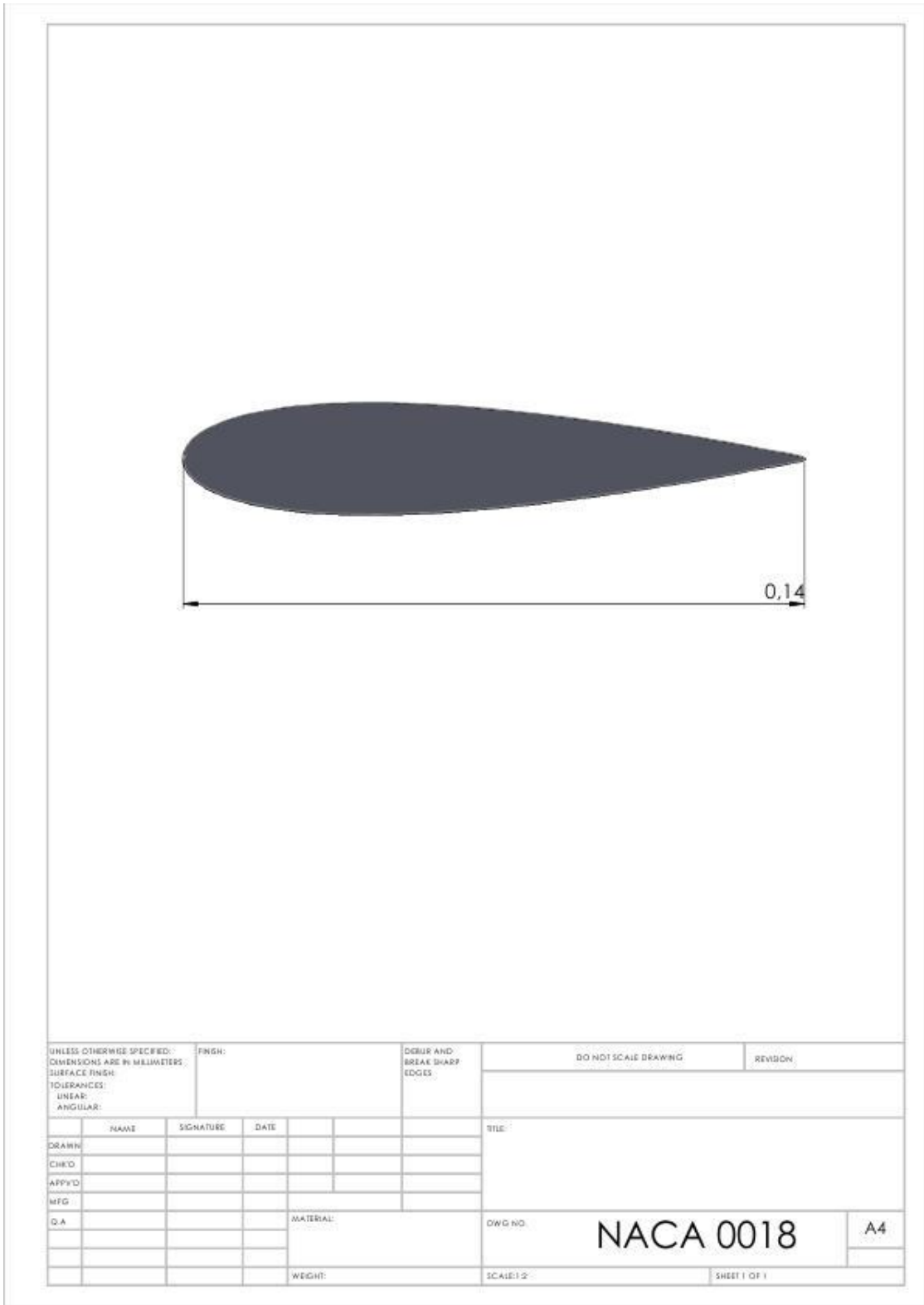


Рис. В1. Креслення профілю NACA 0018 для макетного взірця ВР з КВП

ДОДАТОК Г
Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної
роботи Національного університету
«Львівська політехніка»



Давидчак О.Р.

2015 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Климка Володимира Івановича
«Вітросонячні системи електроживлення малопотужних споживачів»

Комісія у складі:

Голова: зав. кафедрою електроприводу і комп'ютеризованих електромеханічних систем (ЕПК), д.т.н., професор Лозинський О. Ю.

Члени: проф. каф. ЕПК, д.т.н., проф. Паранчук Я. С.
проф. каф. ЕПК, д.т.н., проф. Мороз В.І.

склали цей акт про те, що основні положення та результати дисертаційної роботи Климка Володимира Івановича на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук використовуються у навчальному процесі на кафедрі ЕПК, а саме:

- розроблені автором алгоритми роботи на вищому рівні вітросонячних систем електроживлення різних конфігурацій використовуються при підготовці студентів спеціальності 7.05070204 – «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» у початковій дисципліні «Автоматизація типових технологічних процесів» (Тема 2: Неперервне автоматичне регулювання параметрів технологічного процесу);

- розроблена автором система електричного навантаження синхронного генератора з постійними магнітами за допомогою DC-DC-перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією та формуванням перервних струмів на вході трифазного випрямляча використовується при підготовці студентів базового напрямку 6.050702 «Електромеханіка» у початковій дисципліні «Напівпровідникові силові перетворювачі в електромеханічних системах» (Тема 7: Широтно-імпульсні перетворювачі).

Зав. каф. ЕПК, д.т.н., проф.

О.Ю. Лозинський

Проф. каф. ЕПК, д.т.н., проф.

Я.С. Паранчук

Проф. каф. ЕПК, д.т.н., проф.

В.І. Мороз



www.ecost.net.ua
www.ecost.lviv.ua

ПРИВАТНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ЕКО-СТ»

Львівська область, м. Львів, 79049, вул. Скрипника, 31 / 26, тел. 245-58-83
 р/рах. № 26007188354 у АТ «Райффайзен банк Аваль»
 свідоцтво платника ПДВ 100244079, ІПН 366099113509
 код ЄДРПОУ 36609915, МФО 380805

Акт

Про використання результатів дисертаційної роботи Климка В. І. на тему: «Вітросонячні системи електроживлення малопотужних споживачів»

Комісія з інженерних питань ПП «ЕКО-СТ» у складі директора Станицького О.М. та головного інженера Станицького Т.О. склала цей акт про те, що наукові результати, отримані у дисертаційній роботі Климка В.І., використовуються в інженерній практиці ПП «ЕКО-СТ», яке займається інсталяцією енергоустановок, в тому числі й з використанням поновлюваних джерел енергії.

У практичних роботах ПП «ЕКО-СТ» знайшли місце такі наукові результати, що були отримані дисертантом:

- значення оптимальних річних та сезонних кутів нахилу фотоелектричних панелей до горизонту для різних орієнтувань панелей споживачів, які дають змогу отримувати більшу кількість електроенергії на виході з панелей;
- алгоритми керування на вищому рівні вітросонячними системами електроживлення, які дають можливість забезпечувати ефективне електричне живлення споживачів з різними енергетичними потребами;
- методика параметричної оптимізації, що дає змогу оперативно для будь-якого споживача з конкретним графіком електричного навантаження підібрати оптимальну конфігурацію параметрів елементів системи електропостачання.

Директор


 О.М. Станицький

Головний інженер


 Т.О. Станицький



20.11.2015р.