Міністерство освіти і науки України

Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

Щур Всеволод Ігорович

УДК 621.316.728:621.365.39:621.548.5

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ ВІТРОУСТАНОВКАМИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ І ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Лозинський Андрій Орестович

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради

M В. І. Коруд

Львів — 2017

3MICT

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ	
КЕРУВАННЯ ГЕНЕРУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ В МАЛОПОТУЖНИХ	
АВТОНОМНИХ ВЕУ	. 15
1.1. Особливості конструкції та режими роботи малих автономних ВЕУ.	. 15
1.1.1. Умови роботи та основні типи малопотужних	
автономних ВЕУ	. 15
1.1.2. Особливості перебігу аеродинамічних процесів у ВЕУ з ВВО.	. 19
1.1.3. Аналіз електромеханічних та електронних систем керування	
електричним навантаженням малих автономних ВЕУ	. 26
1.1.4. Режими роботи автономних ВЕУ та системи автоматичного	
керування	. 29
1.2. Системи автоматичного керування роботою малих автономних ВЕУ	35
1.2.1. Системи оптимального керування неповним електричним	
навантаженням СГПМ енергії в автономних ВЕУ	. 36
1.2.2. Системи обмеження максимального електричного	
навантаження ВЕУ за великих вітрів	. 44
1.2.3. Системи керування процесом генерування теплової енергії в	
автономних ВЕУ	. 48
1.3. Висновки до розділу	. 51
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ	
СИМУЛЮВАННЯ РОБОТИ ВЕУ З ГЕНЕРУВАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ	
Й ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ	. 53
2.1. Обґрунтування структури дослідної ВЕУ	. 53
2.2. Розроблення математичних і комп'ютерних моделей основних	
підсистем ВЕУ	. 56
2.2.1. Підсистема турбулентного вітропотоку	. 56
2.2.2. Підсистема BP	. 64

2.2.3. Підсистема СГПМ з векторним керуванням струмом якоря 66
2.2.4. Підсистема бездавачевої САР оптимального керування
моментом (ОТС) навантаження ВР 70
2.3. Дослідження особливостей малопотужних ВЕУ з ВВО
як динамічних керованих об'єктів 70
2.4. Дослідження роботи автономних ВЕУ з ВВО різної потужності на
турбулентних вітрах комп'ютерним симулюванням
2.5. Висновки до розділу 79
РОЗДІЛ З УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
ПІДСИСТЕМОЮ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В
АВТОНОМНІЙ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВІЙ ВЕУ 80
3.1. Визначення оптимальних з електроенергетичної точки зору робочих
координат неповного навантаження ВЕУ 80
3.2. Розроблення комбінованого регулятора з нечітким коректором (НК)
для підвищення енергетичної ефективності оптимального
керування роботою ВЕУ 84
3.2.1. Розроблення комбінованого регулятора для прискорення
перехідних процесів роботи ВЕУ на турбулентних вітрах 89
3.3. Дослідження структур і створення систем обмеження потужності
ВЕУ при роботі на великих вітрах
3.3.1. Розроблення САК для stall-регулювання
3.3.2. Розроблення САК для feathering-регулювання
3.4. Дослідження ефективності генерування електроенергії
в малопотужних ВЕУ з ВВО комп'ютерним симулюванням 104
3.4.1. Робота ВЕУ на турбулентних вітрах малої швидкості 104
3.4.2. Робота ВЕУ на турбулентних вітрах великої швидкості 107
3.5. Висновки до розділу 111
РОЗДІЛ 4 СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИСТЕМИ
ГЕНЕРУВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В АВТОНОМНИХ
ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ВЕУ113

4.1. Квазіоптимальне керування автономною ВЕУ з отриманням
теплової енергії методом періодичного навантаження СГПМ 114
4.2. Оптимальне керування ВЕУ з отриманням теплової енергії
методом низькочастотного імпульсного регулювання
навантаження СГПМ 132
4.3. Система оптимального керування когенераційною
автономною ВЕУ 143
4.3.1. Розроблення нового об'єкта малопотужної вітроенергетики –
когенераційної автономної ВЕУ з ВВО 143
4.3.2. Розроблення системи керування роботою ЕПМЕТ 147
4.3.3. Алгоритм керування енергопотоками в когенераційній
автономній ВЕУ 152
4.3.4. Комп'ютерне моделювання роботи когенераційної
автономної ВЕУ 155
4.3.5. Результати комп'ютерного симулювання роботи
когенераційної автономної ВЕУ 164
4.4. Висновки до розділу 168
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ
ЗАПРОПОНОВАНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО
КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИМИ ВЕУ 170
5.1. Експериментальний стенд для дослідження роботи автономних
електротеплових ВЕУ170
5.2. Фізичний симулятор роботи ВР на турбулентному вітрі 174
5.3. Експериментальні дослідження роботи макетного взірця
електротеплової автономної ВЕУ з періодичним
навантаженням СГПМ 182
5.4. Експериментальні дослідження роботи макетного взірця
електротеплової автономної ВЕУ з імпульсним
низькочастотним навантаженням СГПМ 189

5.5. Експериментальні дослідження роботи макетного взірця	
автономної когенераційної ВЕУ	. 193
5.6. Висновки до розділу	. 197
ВИСНОВКИ	. 198
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	. 201
ДОДАТКИ	. 222
Додаток А. Програма в середовищі Mathcad для математичного	
моделювання часової залежності швидкості турбулентного	
вітропотоку	. 223
Додаток Б. Програма в середовищі Mathcad для математичного	
моделювання електромеханічних процесів при періодичному	
навантаженні ВР	. 226
Додаток В. Програма в середовищі Mathcad для математичного	
моделювання електромеханічних процесів при імпульсному	
низькочастотному керуванні навантаженням СГПМ	. 229
Додаток Г. Математичне моделювання фізичних процесів різної	
природи, що мають місце в ЕПМЕТ	. 230
Додаток Д. Результати комп'ютерного симулювання роботи	
когенераційної автономної ВЕУ в зонах повної зарядженості	
та розрядженості АБ	. 236
Додаток Е. Акти про використання результатів роботи	. 243

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Скорочення, позначення	Пояснення
АБ	Акумуляторна батарея
ABH	Активний випрямляч напруги
АГ	Асинхронний генератор
АД	Асинхронний двигун
BBO	Вертикальна вісь обертання
ВЕУ	Вітроенергетична установка
BP	Вітроротор
ГВО	Горизонтальна вісь обертання
ДШВ	Давач швидкості вітру
ЕПМЕТ	Електромагнітний перетворювач механічної енергії в теплоту
EPC	Електрорушійна сила
ККД	Коефіцієнт корисної дії
НК	Нечіткий коректор
РШ	Регулятор швидкості
САК	Система автоматичного керування
САР	Система автоматичного регулювання
СГПМ	Синхронний генератор з постійними магнітами
ТВМП	Точка відбору максимальної потужності
TEH	Термоелектричний нагрівач
СНР	Combine Heat-Power generation (комбіноване електротеплове генерування)
DTC	Direct Torque Control (пряме керування моментом)
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine (вітроустановка з горизонтальною віссю обертання)
HCS	Hill-Climb Searching (пошук шляхом підіймання на пагорб)

Скорочення, позначення	Пояснення
IP	Internet Protocol (інтернет протокол)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (прямування до точки максимуму потужності)
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics (національний консультативний комітет з повітроплавання)
OPC	Optimal Power Control (керування за оптимальною потужністю ВР)
OTC	Optimal Torque Control (керування за оптимальною моментом ВР)
PLC	Programmable logic controller (програмований логічний контролер)
PSO	Particle Swarm Optimization (часткова роєподібна оптимізація)
P&O	Perturbation and Observation (збурення та спостереження)
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition (розподілені системи спостереження та керування)
SDK	Software Development Kit (набір із засобів розробки програмного забезпечення)
ТСР	Transmission Control Protocol (Протокол керування передачею)
TSR	Tip Speed Ratio (відносна швидкохідність)
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine (вітроустановка з вертикальною віссю обертання)

ВСТУП

У багатьох країнах світу, особливо в розвинених, темпи розвитку відновлюваної енергетики постійно зростають [148]. Чільне місце в цьому процесі займає вітроенергетика, що представлена вітроустановками великої потужності, які часто об'єднують у цілі вітропарки [3, 94, 165]. Поряд з цим останнім часом більшого 10 щораз поширення набувають малопотужні (до кВт) вітроенергоустановки (ВЕУ), які, зазвичай, працюють в автономному режимі [33, 130, 159]. Їх застосовують окремі споживачі для електрозабезпечення у випадках відсутності централізованих електромереж, або за наявності останніх для додаткового електроживлення з метою зниження електроспоживання від мережі, підвищення енергоефективності забезпечення безперебійності та електропостачання тощо [15, 31].

Малопотужні ВЕУ встановлюють безпосередньо біля споживачів, де вітер переважно характеризують невисокі середні швидкості, часті пориви, зміна напрямків і висока турбулентність. Особливості розташування та специфічні характеристики вітру зумовлюють суттєву відмінність конструкцій малопотужних ВЕУ від уже традиційних великої потужності, зокрема застосування ВЕУ з вертикальною віссю обертання (BBO) [2]. Ці ВЕУ ефективно працюють з поривчастими вітрами, постійно сприймають вітер різних напрямків і стартують малої швидкості вітру завдяки прямому, безредукторному, за приводу тихохідного багатополюсного синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ) [59].

Питома (на одиницю потужності) вартість малопотужних ВЕУ з ВВО значно вища, ніж потужних ВЕУ. Тому задля скорочення терміну окупності в малопотужних ВЕУ особливу увагу приділяють забезпеченню їхньої максимальної енергетичної ефективності в усіх режимах роботи, особливо за низьких швидкостей вітру, при яких ці ВЕУ працюють переважну більшість часу. Створення високоякісних ефективних систем автоматичного керування ВЕУ з ВВО вимагає адекватного математичного опису процесів у різних режимах роботи.

Через Актуальність теми. стохастичну природу генерування та споживання електроенергії в автономних ВЕУ для забезпечення неперервності електроживлення кращого використання генерованої електроенергії та застосовують нагромаджувачі, найчастіше електрохімічні акумуляторні батареї (АБ) [77]. Проте їхня висока вартість і порівняно низький термін служби значно підвищують сукупну вартість системи автономного електроживлення на базі ВЕУ. Для економії коштів, знижують ємність встановлених АБ, внаслідок чого зростає частина генерованої електроенергії, яку не можливо безпосередньо спожити чи нагромадити. Таку електроенергію (англ. "dump energy") або ВЕУ зменшуючи генеровану потужність, або втрачають, корисно використовують, навантажуючи додатково генератор термоелектричними нагрівачами (ТЕН), які вміщують у бойлер задля підігрівання води для опалення та гарячого водопостачання [124]. ВЕУ, яка продукує електричну та теплову енергію, можна назвати електротепловою.

Питанням спільного розгляду генерування електричної та теплової енергії у малопотужних електротеплових ВЕУ й розробленню нових підходів до побудови енергоефективних і водночас простих систем керування цими процесами досі практично не приділяли належної уваги. Зважаючи на необхідність економічної привабливості ВЕУ, що призведе до розширення сфер їхнього застосування, такі задачі особливо актуальні [28].

У відомих електротеплових ВЕУ генерування теплоти здійснюється з уже згенерованої електричної енергії. Потужність потоку теплоти при цьому обмежує потужність допустима електричного генератора. Новим альтернативним вирішенням є застосування у ВЕУ з ВВО, крім традиційного СГПМ, додаткового механічну BP теплового генератора, який перетворюватиме енергію безпосередньо в теплову, минаючи проміжну електричну ланку [123]. У такій когенераційній ВЕУ спеціальний тепловий генератор значно простіший і має суттєво вищі показники питомої потужності, порівняно з електричним, а звідси - невисоку вартість. Таке вирішення має низку переваг, пов'язаних з розширенням функціональних можливостей когенераційної ВЕУ, підвищенням її енергетичної ефективності та зниженням сукупної вартості завдяки можливості відмови від застосування АБ. Для ефективної роботи когенераційної ВЕУ необхідним є розроблення спеціальної системи керування потоками енергії, яка виконуватиме функції моніторингу відбору енергії від вітру, генерування та споживання електричної й теплової енергії, а також багаторівневе оптимальне керування цими процесами.

<u>Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.</u>

проводилися в Національному університеті «Львівська Дослідження політехніка» відповідно до наукового напрямку Інституту енергетики та систем керування «Ресурсозберігаючі технології та інтелектуальні системи керування в енергозабезпеченні об'єктів економічної діяльності». Дисертація виконувалася в межах держбюджетних науково-дослідних робіт: «Електромеханотронна система перетворення енергії для безредукторних вітроустановок з вертикальною віссю обертання» (держреєстрація № 0109U001155, 2009-2010 рр.), «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.

Метою роботи є розроблення нових ефективних систем керування автономним и вітроустановками малої потужності з вертикальною віссю обертання для генерування електричної й теплової енергії в умовах низькопотенціальних турбулентних вітрів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

проаналізувати існуючі структури та системи керування малопотужних
ВЕУ з ВВО та визначити перспективні напрями підвищення ефективності їхньої
роботи в умовах низькопотенціальних турбулентних вітрів;

розробити математичні й імітаційні комп'ютерні моделі підсистем ВЕУ з
BBO та дослідити закономірності роботи малопотужних вітроустановок;

 створити систему енергоефективного керування ВЕУ з врахуванням впливу параметрів навколишнього середовища на аеродинамічну характеристику вітроротора з ВВО;

 розробити системи керування для обмеження потужності ВЕУ та дослідити їхню роботу на високошвидкісних вітрах;

 запропонувати структури та розробити системи ефективного керування електротепловими ВЕУ з СГПМ;

– розробити дворівневу систему керування когенераційною ВЕУ з електричним і тепловим генераторами;

– виготовити макетні взірці запропонованих систем керування електротепловою ВЕУ з ВВО та провести їх лабораторні дослідження.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії вітру в електричну і теплову в малопотужних ВЕУ з ВВО.

Предметом *дослідження* є структури, параметри та способи енергоефективного керування роботою малопотужних автономних ВЕУ з ВВО для генерування електричної й теплової енергії.

Методи дослідження. У дослідженнях використано методи теорії автоматичного керування (для аналізу систем і синтезу оптимальних законів керування), теорії нечітких множин (для структурно-параметричного синтезу нечіткого регулятора), аеродинамічної теорії (для опису процесів у вітророторах і створення моделей вітрових потоків), теорії математичного моделювання електромеханічних систем (для створення моделей досліджуваних об'єктів), метод імітаційного моделювання (для створення комп'ютерних моделей керованих вітроенергетичних систем та їх дослідження), а також результати робіт провідних вчених в області вітроенергетики.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Набула подальшого розвитку теорія керування ВЕУ, зокрема встановлено математичну залежність аеромеханічної сталої часу вітроротора від

його параметрів, які визначають потужність ВЕУ, а також швидкості вітру, що забезпечило можливість створення нових систем керування для підвищення показників роботи малопотужних ВЕУ, особливо на турбулентних вітрах із низькою середньою швидкістю.

2. Уперше синтезовано комбіновану систему керування ВЕУ, яка здійснює регулювання електромагнітного моменту генератора за відхиленням його кутової швидкості від оптимальної та за збуренням швидкості вітру з коректором оптимальних координат на базі нечіткої логіки, що дало змогу врахувати залежність аеродинамічних характеристик вітроротора від параметрів навколишнього середовища та підвищити на основі цього кількість генерованої електроенергії.

3. Уперше запропоновано методи двопозиційного оптимального регулювання навантаження генератора ВЕУ на термоелектричні нагрівачі з різними способами формування гістерезису та синтезовано відповідні системи керування роботою електротеплових ВЕУ, які поєднують високу енергетичну ефективність з низькою вартістю установки.

4. Створено систему різноцільового керування електромагнітним перетворювачем механічної енергії в теплоту, що дало змогу побудувати дворівневу систему енергоефективного керування роботою когенераційної автономної ВЕУ з вертикальною віссю обертання.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблені методика та відповідне програмне забезпечення дають змогу визначати раціональні параметри вітроенергетичних систем для генерування електричної й теплової енергії, виходячи із середньої швидкості вітру в заданій місцевості.

Запропонований і захищений патентом України спосіб перетворення механічної енергії вітроколеса в електричну й теплову, а також пристрій для його реалізації служать базою для створення малопотужних автономних

елетротеплових ВЕУ, яким властива висока енергетична енергоефективність і простота керування.

Запропонований і захищений патентом України пристрій – електромагнітний перетворювач механічної енергії в теплову (ЕПМЕТ) – дає змогу підвищити кількість отриманої від вітру енергії малопотужними автономними ВЕУ з ВВО та використати її у вигляді теплоти, необхідної для побутових потреб.

Створені та досліджені макетні взірці електротеплової ВЕУ, які підтверджують працездатність і енергоефективність запропонованих систем керування, можуть слугувати прототипами подальших розробок.

Результати проведених досліджень використовуються в науково-дослідних роботах, які виконують у СКБ електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка» та науково-виробничій фірмі ПП «ЕКО-СТ» для створення систем автономного енергозабезпечення на базі ВЕУ, а також у навчальному процесі на кафедрі «Електропривод та комп'ютеризовані електромеханічні системи» Національного університету «Львівська політехніка».

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно.

У друкованих працях, які опубліковані в співавторстві, автором: [42] проведено імітаційні комп'ютерні дослідження енергоефективності роботи ВЕУ різної потужності при роботі на низькошвидкісних турбулентних вітрах; [40] – створено імітаційну комп'ютерну модель і проведено симуляційні дослідження роботи електротеплової ВЕУ; [123] - створено експериментальну установку та проведено дослідження закономірностей процесу генерування теплоти в рухомому струмопровідному середовищі за допомогою стаціонарного магнітного поля; [21] – розроблено комбінований регулятор з нечітким коректором для енергоефективного керування роботою ВЕУ з врахуванням впливу параметрів навколишнього середовища на аеродинамічні властивості ВР; [41] - створено дослідну установку та проведено експериментальні дослідження роботи ЕПМЕТ; [22] запропоновано структуру системи енергоефективного керування —

електротепловою ВЕУ; [23] – запропоновано конструкцію ротора теплового генератора з системою відбору енергії в тепловий акумулятор.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи, результати досліджень і висновки викладені в доповідях, обговорені та отримали позитивну оцінку на таких науково-технічних конференціях: XII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювальна енергетика XXI століття» (смт. Миколаївка, Крим, 2011); Х Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2012); Міжнародна науково-технічна конференція до 80-річчя заснування факультету енергетики і автоматики Національного університету біоресурсів і природокористування України «Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК (м. Київ, 2012); XX та XXII Міжнародні науково-технічні конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Харків, 2013, 2015), а наукових семінарах кафедри «Електричні машини i також апарати» Національного університету «Львівська політехніка» та науковому семінарі Наукової Ради НАН України «Моделі та методи комп'ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем».

Публікації. За тематикою дисертаційної роботи опубліковано 11 наукових праць (4 одноосібно), серед яких 6 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття в науковому періодичному виданні іншої держави (індексована в наукометричній базі Scopus), 2 патенти України на винахід, тези 2-х конференцій.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ГЕНЕРУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ В МАЛОПОТУЖНИХ АВТОНОМНИХ ВЕУ

1.1. Особливості конструкції та режими роботи малих автономних ВЕУ

1.1.1. Умови роботи та основні типи малопотужних автономних ВЕУ. На відміну від потужних ВЕУ, які споруджують у місцях з високим вітровим ресурсом, малопотужні автономні ВЕУ встановлюють окремі споживачі, зазвичай, на присадибних ділянках безпосередньо біля місць споживання генерованої енергії. Окремим підтипом малих ВЕУ є будинкові, які встановлюють на дахах будинків, у тому числі й у містах. У науковій літературі цей напрям вітроенергетики отримав назву urban wind turbine [54, 89, 170]. На теренах України, як і в більшості країн світу, міські території характеризують переважно невисокі середньорічні швидкості вітру. Так, для Львівської області ця величина становить від 3,0 до 4,5 м/с. У місцях, де ВЕУ на присадибних ділянках розміщені порівняно невисоко, дерева та навколишні забудови призводять до частих змін напрямку та сили вітру, що зумовлює його турбулентний характер і вимагає кардинально інших підходів до побудови ефективних конструкцій ВЕУ [10, 31].

Серед мікропотужних ВЕУ (до 0,5 кВт) трапляється ще багато ВЕУ з горизонтальною віссю обертання (ГВО, англ. НАШТ), які завдяки малим розмірам легко закріплювати, наприклад, на електричних опорах чи рекламних щитах, забезпечуючи електроенергією локальне освітлення [32, 43]. Такі мікроВЕУ легко самоналаштовуються на напрям вітру завдяки хвостовому стабілізатору та практично не створюють шумів [19, 141].

Для малих ВЕУ з ГВО потужністю понад 2 кВт для налаштовування на напрям вітру необхідна вже система електроприводу гондоли зі своєю системою керування (yaw control). В умовах швидкозмінного за напрямком вітру такі ВЕУ втрачатимуть значну частину енергії вітру, а також генерованої електроенергії на перелаштування [20]. Окрім цього, ВЕУ з ГВО через змінну по довжині лопаті лінійну швидкість руху створюють значні, шкідливі для живих організмів шуми, а також розпочинають роботу лише за середніх швидкостей вітру [165].

Наведені результати [59, 159] продемонстрували, що, не зважаючи на нижчі аеродинамічні показники, у вказаних вище умовах ВЕУ з ВВО (VAWT) мають низку переваг над ВЕУ з ГВО, основними з яких є такі [2, 70, 132, 142]:

• сприймання вітру з будь-якого напрямку, що виключає потребу в механізмах і пристроях орієнтації на вітер;

• краща робота на вітрах невеликої швидкості та високої турбулентності;

• низька стартова швидкість вітру;

• можливість розміщення електричного генератора за межами ВР, у тому числі й безпосередньо на площадці встановлення ВЕУ, що зменшує навантаження на щоглу та дає змогу збільшити розміри генератора, застосувавши при цьому безредукторну трансмісію (прямий привід) між ВР і генератором;

• нижчі аеродинамічні вимоги до конструкції ВР, що спрощує його виготовлення та знижує вартість;

• практична відсутність шумів під час роботи.

На відміну від ВЕУ з ГВО, які будують за традиційною схемою та відрізняють, в основному, за кількістю лопатей, ВЕУ з ВВО [169] мають різноманітні конструкцій, зокрема, зображені на рис. 1.1.

Аналіз доступної інформації, зокрема публікацій у провідних електротехнічних журналах і патентів, дав змогу класифікувати ВЕУ з ВВО за такими ознаками:

швидкохідністю, шо зумовлено переважаючою дією 3a диференційованої сили лобового тиску чи підйомної сили – тихохідні (BP Sistan з пластинчастими лопатями, Савоніуса 3 лопатями S-подібної форми, чашкоподібними чи турбінними, zephyr potop) [50, 131, 150], швидкохідні (ВР Дар'є з яйцеподібними, прямими чи гелікоподібними лопатями, Н-ротор) [30, 47, 51, 71, 131], середньої швидкохідності (ВР Дар'є з чотирма та більше прямими лопатями, комбіновані ВР з роторами Савоніуса і Дар'є) [55, 101, 147, 155];



Рис. 1.1. Різновиди конструкцій ВЕУ з ВВО (за інформацією з мережі Internet)

• за можливістю керування аеродинамічними характеристиками ВР – пасивні (некеровані з незмінними аеродинамічними характеристиками), самоналагоджувальні (із змінними, залежними від кутової швидкості ВР аеродинамічними характеристиками) [56, 162] й активні (з поворотними лопатями [164, 176], зі зміною профіля лопатей [91]);

• за кількістю ВР – однороторні, двороторні (контроторні з роторами, що обертаються в різних напрямках) і багатороторні [8, 16, 105, 115, 118, 139, 166,];

• за впливом на набігаючий на ВР вітровий потік – з вільним омиванням ВР і з концентрацією вітропотоку (стаціонарні [144] та поворотні до вітру [26, 72] концентратори);

• за видом механічної трансмісії – з мультиплікатором і з прямим приводом генератора [143];

• за типом електричного генератора (асинхронний короткозамкнений, асинхронний з фазним ротором, синхронний з електромагнітним збудженням, СГПМ, асинхронно-синхронний та ін.) [49, 69, 90, 121, 171];

• за способом регулювання електричного навантаження генератора – для кожного з типів генератора декілька варіантів [14, 69, 128];

• за характером роботи – автономні та підключені до централізованої електричної мережі [15, 130];

• за способом регулювання робочої точки – з пасивним регулюванням [152], з активним аеродинамічним регулюванням [164], з активним електричним регулюванням [68, 77, 98], з комбінованим регулюванням [176];

• за способом оптимального керування неповного навантаження ВЕУ – давачеві (з анемометром) і бездавачеві з автоматичним регулюванням різними методами [109] (див. підрозділ 1.2.1);

• за способом обмеження максимальних значень кутової швидкості ВР і потужності ВЕУ – аеромеханічне обмеження (pitch control) [176], зменшення або збільшення швидкохідності ВР електричним навантаженням задля зменшення

відбору потужності (stall control, feathering) [129, 154], додаткове електричне навантаження з можливістю генерування теплової енергії (dump) [126], комбіноване обмеження.

Відповідно до запропонованої класифікації можливі різні комбінації з вказаних у кожній з ознак варіантів. Доцільність застосування того чи іншого типу вітроустановки оцінюємо за таким показником, як термін окупності. Цей інтегральний економічний показник, який сприяє поширенню малої вітроенергетики, містить два інші, які безпосередньо на нього впливають максимальну енергетичну ефективність і мінімальну вартість [32]. Оптимальне поєднання цих показників, на нашу думку, варто покласти в основу концепції побудови малопотужних ВЕУ з ВВО, яка дасть змогу обґрунтувати перспективні конструкції ВЕУ та розробити ефективні способи керування ними відповідно до особливостей перебігу взаємопов'язаних процесів різної природи аеродинамічних, електромеханічних, електронних, теплових, що відбуваються під час роботи ВЕУ.

1.1.2. Особливості перебігу аеродинамічних процесів у ВЕУ з ВВО. Аеродинамічні процеси, які відбуваються під час роботи ВР, математично описують на основі теорії обертання диску у відкритому потоці (рис. 1.2, а) [91, 104]. Потік повітря з густиною ρ_{Π} , що охоплює диск, в околі диску площею A_1 має швидкість V_1 . Цей потік на віддалі перед диском має, відповідно, площу A_0 та швидкість V_0 , а на віддалі за диском, у так званому кільватері, $-A_2$ та V_2 . Виходячи з неперервності потоку

$$\rho_{\pi}A_0V_0 = \rho_{\pi}A_1V_1 = \rho_{\pi}A_2V_2 , \qquad (1.1)$$

можна записати

$$V_1 = V_0(1-a); \quad A_1 = A_0(1-a)^{-1}, \quad V_2 = V_0(1-2a); \quad A_1 = A_0(1-2a)^{-1}, \quad (1.2)$$

де *а* – показник індукції, який показує у в.о., наскільки робота диску призводить до зниження швидкості потоку повітря на осі перед ним.



Рис. 1.2. Моделі обертання диску (а) та ВР з ВВО (б) у відкритому просторі

Відбір диском потужності від вітру представляють як зміну потужності кінетичної енергії потоку, що пронизує диск, тобто різниця між потужностями цього потоку на віддалі від диску та в далекому кільватері за ним [104]:

$$P = \frac{1}{2} \rho_{\rm n} A_0 V_0^3 - \frac{1}{2} \rho_{\rm n} A_2 V_2^3 . \qquad (1.3)$$

Ця потужність, з врахуванням умови неперервності потоку (1.1) та зміни його сили тиску ΔT (поштовх) до та після диску, може бути виражена як

$$P = \Delta T V_1 = \rho_{\rm n} A_0 V_0^2 (1 - a) (V_0 - V_2) . \qquad (1.4)$$

За визначенням, коефіцієнт використання диском потужності вітрового потоку C_P (далі – коефіцієнт потужності) показує, яка частина потужності потоку вітру, що проходив би через площу, рівну площі омивання ротора A_1 у випадку його відсутності, може бути відібрана ротором, тобто

$$P = \frac{1}{2} \rho_{\rm n} A_{\rm l} V_0^3 C_{\rm P} \ . \tag{1.5}$$

Значення C_P можна визначити з (1.5), підставивши P з рівняння (1.4) та врахувавши (1.2):

$$C_{\rm P} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho_{\rm n}A_{\rm l}V_0^3} = 4a(1-a)^2 . \qquad (1.6)$$

Залежність (1.6) за a = 1/3 досягає свого максимуму, рівного

$$C_{\rm Pmax} = \frac{16}{27} \cong 0,5926. \tag{1.7}$$

Цей результат незалежно один від одного та майже одночасно одержала низка авторів, за іменем одного з яких (Betz, 1920 р.) названо теоретичний ліміт відбору потужності вітру на рівні 0,593 [165].

При a = 1/3 швидкість вітру перед ротором V_1 зменшується відповідно до (1.2) на 33% від початкової швидкості вітру V_0 , у той час, як нижче за течією швидкість V_2 зменшується вже на 67%. Це означає, що максимальна потужність від вітрового потоку може бути відібрана, якщо швидкість вітру в зоні диску ротора зменшиться на 33% порівняно з незбуреним вітровим потоком.

Для ВР з ВВО теж справедливі викладені вище основні положення теорії обертання диску у відкритому потоці [102]. При цьому диск замінюють циліндричним об'ємом (рис. 1.2, б). У порівнянні з круглою площиною вітроколеса НАWT, площа омивання ВР з ВВО моделюють двома дисками (один напівциліндр проти вітру та інший за вітром). Перед ротором швидкість вітру сповільнюється, порівняно з незбуреною на віддалі вгору за течією від ротора. Як було показано теоретично [52] на основі застосування рівняння Бернулі до потоків вітру перед та за ротором, а також застосування рівняння збереження імпульсу до всього потоку повітря (1.2), швидкість вітру в зоні ротора V_1 має середнє значення між швидкістю незбуреного вітру V_0 вгору за течією (upstream) і швидкістю вітру за ротором V_2 у далекому кільватері (downstream). Іншими словами, перепад швидкості вітру перед ротором рівний перепаду за ротором, як показано на рис. 1.2, б. Подальше використання отриманих швидкостей повітря в

рівнянні Бернулі показало, що тиск повітря відразу після ротора (підвітряний тиск) фактично всмоктуючий (тиск нижчий, ніж атмосферний) на величину, яка дорівнює підвищенню тиску прямо перед ротором, як показано на рис. 1.2, а.

Отримане максимальне значення коефіцієнта потужності C_{Pmax} є лише теоретичною межею, до якої може наближатися реальний ВР за оптимальної для конкретної швидкості вітру його кутової швидкості ω . Безрозмірна величина цієї кутової швидкості виражається такою величиною, як швидкохідність ВР (англ. TSR – Tip Speed Ratio), тобто відношення максимальної лінійної швидкості ВР з радіусом *r* до фактичної швидкості вітру $V_{\rm B} = V_0$:

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_{\rm B}}.\tag{1.8}$$

Залежність $C_{\rm P}(\lambda)$ – основна безрозмірна характеристика аеродинамічних властивостей ВР, яку, зазвичай, вважають сталою (для аеродинамічно пасивного ВР) і незалежною від умов роботи ВР (рис. 1.3) [6, 35, 165].

Аналіз кривих на рис. 1.3 з точки зору прийнятої концепції побудови ВЕУ дає змогу віддати перевагу швидкохідному ВР Дар'є, причому з прямими лопатями, що спрощує їх виготовлення з дотриманням точності вибраного аеродинамічного профілю (найчастіше профілі NACA [135]). Такі 2-лопатеві ВР ще називають Н-ротором, проте цю назву часто використовують і на ВР з більшою кількістю прямих лопатей. Досить високе значення C_{Pmax} для таких ВР, яке наближається до відповідного значення для НАШТ, дає змогу зменшити розміри ВР за заданої потужності ВЕУ, а досить висока оптимальна швидкохідність λ_{opt} зумовлює більші значення кутових швидкостей ВР, що дає змогу відмовитися від мультиплікатора, застосувавши прямий привід генератора. Усе це позитивно вплине на вартість ВЕУ.



Рис. 1.3. Типові залежності $C_{\rm p}(\lambda)$ для основних типів ВР з ВВО: 1 – межа Бетца; 2 – ідеальний ВР; 3 – швидкохідний ротор Дар'є (2-3 лопаті); 4 – ротор Дар'є середньої швидкохідності (4-6 лопатей); 5 – ротор Савоніуса

На рис. 1.4 показано, як формується результуючий вектор швидкості $V_{\rm R}$ набігаючого на лопать потоку повітря при різних кутових положеннях лопатей. Коли вони рухаються набагато швидше порівняно зі швидкістю збуреного вітру V_1 , тобто λ є достатньо високим, то лопаті «різатимуть» вітер під малими кутами атаки β . У напрямку результуючого вектора швидкості $V_{\rm R}$ на лопать діє сила тиску $F_{\rm d}$ (drag force), а в перпендикулярному напрямку – підйомна сила F_1 (lift force). Величини цих сил визначають відповідні експериментально визначені коефіцієнти C_1 і $C_{\rm d}$, які залежать від кута атаки, геометрії лопаті та швидкості результуючого потоку повітря [75]. Останню задає відповідне значення числа Рейнольдса [144]:

$$\operatorname{Re} = \frac{cV_{\mathrm{R}}}{v},\tag{1.9}$$

де *v* – кінематична в'язкість речовини (повітря), що обтікає ВР, м²/с.



Рис. 1.4. Схема, що пояснює принцип роботи Н-ротора

Як видно з рис. 1.4, в азимутальних положеннях лопаті $\theta = 0^{\circ}$ і $\theta = 180^{\circ}$ (положення 1 і 3) підйомна сила відсутня, а діюча сила тиску $F_{\rm d}$, спрямована проти напрямку руху лопаті, гальмує обертання ВР. В азимутальних положеннях лопаті $\theta = 90^{\circ}$ і $\theta = 270^{\circ}$ (положення 2 і 4) сформовані вітром і рухом лопаті сили $F_{\rm d}$ та $F_{\rm 1}$ мають однаковий характер стосовно напрямку руху лопаті. Результуюча їхніх проекцій на напрям руху, так звана тангенціальна сила, якраз і створює механічний момент і змушує ротор обертатися. Середнє значення моменту за оберт лопаті матиме додатне значення, причому лопать зазнаватиме найбільших поштовхів моменту в діапазоні азимутальних кутів $\theta = 50^{\circ}$ -130° і $\theta = 230^{\circ}$ -310°. Для зменшення пульсації моменту застосовують ВР з більшою кількістю лопатей – 4-6, проте це призводить до зростання завихрень і відхилення картини від ідеальної вищеописаної.

Реальні аеродинамічні процеси відрізняються від описаного ідеального тим, що в результаті обертання лопатей потоки повітря набувають завихрень, які порізному взаємодіють з елементами поверхні лопатей. Врахувати та змоделювати ці процеси з досить високою вірогідністю можна, лише застосувавши теорію обчислювальної гідро-газодинаміки CFD (Computational Fluid Dynamics), в основі якого лежить рівняння Нав'є-Стокса, моделі турбулентності, а розв'язок проводять за методом скінченних елементів [51].

Стартовий момент, що зрушує ротор з нерухомого положення, теж залежить від кутового положення ротора відносно напряму вітру. Стрімке падіння залежності $C_P(\lambda)$ у напрямку зниження швидкохідності, як видно з рис. 1.3, вказує на слабку здатність до старту H-ротора (self-starting problem) [71]. Зважаючи на дуже мале середнє за оберт значення стартового моменту для H-ротора, особливо на низькошвидкісних вітрах, ВР треба розкрутити до кутової швидкості, за якої появиться достатня підйомна сила. Для цього часто застосовують генератор, який для старту ВР виконує функцію двигуна. Проте такий вибір потребує відповідної системи приводу та системи керування, яка приймає рішення про доцільність старту ВР, що, звісно, ускладнює ВЕУ та підвищує її вартість.

Важливим геометричним параметром Н-роторів є коефіцієнт заповнення лопатями площі омивання ВР (solidity) [119]:

$$\sigma = \frac{n_{\rm b} c}{2 r},\tag{1.10}$$

де *n*_b – кількість лопатей ВР; *с* – довжина хорди лопаті ВР.

Від значення коефіцієнта σ залежатимуть стартові та робочі характеристики H-ротора. При збільшенні σ крива $C_P(\lambda)$ зміщується вліво та вниз – зменшується швидкохідність λ_{opt} і знижується коефіцієнт потужності C_{Pmax} [133]. Це покращує стартові характеристики BP – він починатиме роботу при нижчій швидкості вітру, зате погіршаться його робочі характеристики – зменшиться відбір потужності від вітру. Таким чином, необхідне оптимальне значення σ для поєднання стартових і робочих характеристик H-роторів.

Значно покращити одночасно як стартові, так і робочі характеристики ВР з ВВО, в тому числі й Н-ротора, можна, застосувавши концентрації вітрового потоку за допомогою стаціонарного чи поворотного на напрям вітру концентраторів [26, 151]. Перші з вказаних мають конструкційні та цінові переваги, хоча дещо нижчу енергетичну ефективність. Концентратор вітропотоку, звісно, дещо підвищить вартість ВЕУ, проте, як показано в [15], його можна використати багатофункціонально: як несучу конструкцію ВЕУ для захисту від шквальних вітрів, а також для монтажу сонячних панелей.

1.1.3. Аналіз електромеханічних та електронних систем керування електричним навантаженням малих автономних ВЕУ. У малопотужних ВЕУ застосовують електричні генератори різних типів, як традиційної конструкції асинхронні короткозамкнені з самозбудженням, асинхронні з фазним ротором у подвійного вигляді машини живлення, синхронні 3 електромагнітним збудженням, СГПМ, вентильні реактивні [49, 64, 90, 171], так і нових типів – генератори з постійними магнітами та перемиканням потоку, асинхронні з постійними магнітами, ковзно-синхронні з постійними магнітами та ін. [69, 81]. Генератори нових типів мають низку переваг над традиційними, проте їхня конструкція ще не завершена, проектування та виготовлення ускладнені, що негативно впливає на вартість. Тому увагу варто зосередити на електричних генераторах традиційної конструкції. Відповідно до прийнятої концепції побудови ВЕУ для забезпечення високої енергетичної ефективності роботи Нротора в малопотужній ВЕУ найдоцільніше застосувати СГПМ, що й зроблено в переважній більшості досліджень [44, 49, 92, 99, 125, 140, 156]. Така машина дає змогу легко замінити механічну передачу на електромеханічну, збільшивши до потрібної кількості число пар полюсів. Водночас відсутність мультиплікатора забезпечить низку позитивних якостей: призведе до зменшення втрат енергії в трансмісії, покращить старт ВЕУ, підвищить її надійність і знизить вартість [116].

Високу енергетичну ефективність ВЕУ можна гарантувати, лише забезпечивши якісне автоматичне керування її роботою. Зважаючи на низьку надійність роботи механічних систем, які можуть коректувати аеродинамічні характеристики ВР з ВВО, їхнє застосування дуже обмежене, тоді як переважна кількість досліджень зосереджена винятково на електричному регулюванні. У випадку застосування СГПМ таке регулювання можна здійснити, лише змінивши електричне навантаження генератора.

Існує низка способів технічної реалізації регульованого електричного навантаження СГПМ [57, 156]. Між собою вони відрізняються складністю, вартістю, рівнем електромагнітної сумісності з джерелом енергії – СГПМ, а також видом вихідного потоку електричної енергії. Щодо останнього, розрізняють системи вихідної напруги та вихідного струму [57, 109]. В автономних ВЕУ, де застосовують АБ, які є джерелами напруги, переважно використовують системи вихідної напруги, до яких АБ можна підключати безпосередньо або через перетворювач постійної напруги (DC-DC перетворювач). До ланки постійної напруги теж можна легко підключити навантаження, що може живитися постійним струмом (переважна кількість побутових електроспоживачів), а також інвертор напруги для можливості живлення споживачів змінного струму чи під'єднання ВЕУ до мережі живлення. Тому увагу зосередимо на таких системах.

Серед електронних систем регулювання навантаження СГПМ з виходом на постійній напрузі основними вважають дві альтернативні системи: з пасивним випрямлячем (діодним мостом ДМ) й DC-DC перетворювачем і з активним випрямлячем напруги (ABH) (рис. 1.5) [156].



Рис. 1.5. Основні електронні системи регулювання навантаження СГПМ: а) з пасивним випрямлячем і DC-DC перетворювачем, б) з активним АВН

Обидві показані на рис. 1.5 електронні системи дають змогу регулювати потужність електричного навантаження СГПМ і величину напруги на виході

перетворювачів (у тому числі стабілізувати вихідну напругу). Окрім цього, система з АВН має ще дві інші важливі переваги: 1) забезпечує двонапрямлену передачу енергії; 2) формує синусоїдальні лінійні струми генератора з одиничним (чи іншим заданим) значенням $\cos \varphi$ [7, 114]. Перша перевага дає змогу переводити СГПМ у режим двигуна для запуску ВР чи при швидкодіючому керуванні роботою ВЕУ на турбулентних вітрах. Друга – забезпечує мінімальні втрати енергії в обмотках якоря СГПМ від вищих гармонік струму. Проте АВН, який складається з 6-и транзисторів, набагато складніший і дорожчий за однотранзисторний DC-DC перетворювач.

Наявність на вході системи з DC-DC перетворювачем діодного моста ДМ (рис. 1.5, а) призводить до значного спотворення лінійних струмів і вихідних напруг СГПМ, що спричиняє цілу низку негативних факторів: збільшує втрати в міді та сталі СГПМ, що знижує його ККД і зменшує додаткове нагрівання, викликає пульсації електромагнітного моменту, збільшує акустичні шуми під час роботи ВЕУ [146].

Для зменшення дії вказаних факторів запропоновано низку рішень, спрямованих на підвищення коефіцієнта потужності цієї системи: 1) заміна ланки постійної напруги на ланку постійного струму (заміна конденсатора на дросель L) на вході DC-DC перетворювача (рис. 1.6, а) [129]; 2) застосування малопотужного трифазного активного фільтра струму на виході СГПМ (рис. 1.6, б) [157]; 3) застосування простого коректора струмів якоря СГПМ через формування лінійних струмів на вході трифазного діодного моста ДМ у вигляді перервних імпульсів (рис. 1.6, в) [103]. Перший спосіб простий, проте його ефективність невисока. Другий спосіб характеризує відносна складність і вища вартість активного фільтра струму. У третьому способі в дроселях L1-L3 з малою індуктивністю формуються перервні струми з достатньо високою частотою повторюваності (для фази A i_A на рис. 1.6, в). Завдяки конденсаторам C1-C3 лінійні струми в обмотках якоря СГПМ набувають неперервного, близького до синусоїдальної форми характери i_{Acep} . Цей спосіб простий і достатньо ефективний.



Рис. 1.6. Електронні системи регулювання навантаження СГПМ з низькими спотвореннями струмів якоря генератора: а) з ланкою постійного струму,б) із застосуванням активного фільтра струму, в) з коректором лінійних струмів

генератора, г) часова діаграма, що пояснює роботу коректора для схеми (в)

У роботах [140, 158] запропоновано інший підхід до реалізації регульованого навантаження СГПМ з високою електромагнітною сумісністю. Для цього застосовано напівкерований трифазний випрямляч, що складається з трьох діодів у верхніх групах випрямлення й трьох транзисторів у нижній. За допомогою простого керування транзисторами за принципом ОСС (One Cycle Control) лінійні струми СГПМ формуються з малим загальним коефіцієнтом гармонік (THD < 5%). Проте цей спосіб теж не забезпечує двонапрямленої передачі електричної енергії.

1.1.4. Режими роботи автономних ВЕУ та системи автоматичного керування. У будь-який момент часу ВЕУ перебуває в певній робочій точці, яка залежить від цілої низки факторів: швидкість вітру $V_{\rm B}$, кутова швидкість ВР ω ,

потужність електричного навантаження СГПМ, ККД генератора в цій точці, характер роботи (усталений чи перехідний режим).

В усталеному режимі роботи потужність на валу ВР, відповідно до (1.5), описує вираз

$$P_{\rm BP} = \frac{1}{2} \rho_{\rm \pi} A C_{\rm P}(\lambda) V_{\rm B}^{3}, \qquad (1.11)$$

де площа омивання H-ротора з радіусом r і висотою лопаті $h_{\rm BP}$ становить $A = 2rh_{\rm BP}$ [71].

Механічний момент, який при цьому розвиває ВР, з врахуванням (1.8) буде рівним

$$M_{\rm BP} = \frac{P_{\rm BP}}{\omega} = \frac{1}{2} \rho_{\rm n} A \, r \, \frac{C_{\rm P}(\lambda)}{\lambda} V_{\rm B}^2. \tag{1.12}$$

З виразу (1.12) отримуємо коефіцієнт використання моменту ВР:

$$C_{\rm M}(\lambda) = \frac{C_{\rm P}(\lambda)}{\lambda}.$$
 (1.13)

Як видно з виразів (1.11) та (1.12), безрозмірна аеродинамічна характеристика $C_P(\lambda)$ визначає характер кривих потужності та моменту ВР. Такі характеристики для конкретних ВР отримують або за допомогою розрахунку, моделюючи аеродинамічні процеси під час роботи ВР за методом скінченних елементів у середовищі СFD [51], або експериментально – продуванням ВР в аеродинамічних трубах. У подальших дослідженнях будемо користуватися залежністю $C_P(\lambda)$, яка характерна для трилопатевого H-ротора потужністю понад 1 кВт й отримана аналогічно до результатів праці [97] (рис. 1.7):

$$C_{\rm P}(\lambda) = 1.14 \left(\frac{9.47}{\lambda} - 1\right) e^{\frac{-6}{\lambda}}.$$
 (1.14)



Рис. 1.7. Залежність коефіцієнта потужності H-ротора $C_{\rm P}$ від його швидкохідності λ

Залежність $C_{\rm P}(\lambda)$, що показана на рис. 1.7, забезпечує максимальне значення коефіцієнта $C_{\rm Pmax} = 0,3514$ за оптимального значення швидкохідності ВР $\lambda_{\rm opt} =$ 3,675. Точка $C_{\rm Pmax}(\lambda_{\rm opt})$ називається точкою максимуму відбору потужності (ТМВП) (англійською МРР – maximum power point). Для забезпечення роботи ВР у цій точці його кутову швидкість необхідно підтримувати на оптимальному значенні, яке, відповідно до (1.8), має бути прямо пропорційне до значення швидкості вітру:

$$\omega_{\rm opt} = \frac{\lambda_{\rm opt}}{r} V_{\rm B} \,. \tag{1.15}$$

На основі безрозмірної залежності $C_{\rm p}(\lambda)$ за виразами (1.11) і (1.12) для конкретного ВР можна розрахувати основні залежності, що характеризують його роботу. Для прикладу, на рис. 1.8 та 1.9 побудовано розраховані криві механічного моменту та потужності на валу ВР від його кутової швидкості при сталих значеннях швидкості вітру для ВЕУ з аеродинамічною характеристикою (1.14) та номінальною потужністю 1 кВт, яка розвивається за швидкості вітру 10 м/с. Кривій максимальної потужності $P_{\rm max}$, що з'єднує екстремуми залежностей на рис. 1.9, відповідає крива оптимальних значень моменту ВР $M_{\rm opt}$, яка показана на рис. 1.8.



Рис. 1.8. Залежності механічного моменту на валу ВР від його кутової швидкості при різних швидкостях вітру для ВЕУ потужністю 1 кВт



Рис. 1.9. Залежності вихідної механічної потужності ВР від його кутової швидкості при різних швидкостях вітру для ВЕУ потужністю 1 кВт

Проаналізувавши вираз (1.9), можна зробити висновок, що для одного й того ж ВР при тій же його швидкохідності число Рейнольдса збільшуватиметься зі зростанням швидкості вітру. Це призводить до зростання коефіцієнтів C_1 і C_d та, відповідно, до збільшення значень коефіцієнта потужності ВР. Впродовж останнього часу з'явилася низка досліджень, в яких для характеристики ВР вже фігурують уточнені залежності $C_P(\lambda, V_B)$ [88, 106].

Однією з найважливіших характеристик ВЕУ є її крива вихідної потужності – залежність вихідної електричної потужності P_{BEY} від швидкості вітру. Функції такого типу (рис. 1.10), зазвичай, подають графічно в паспортах на конкретні ВЕУ фірми, які їх випускають [66].



Рис. 1.10. Типова залежність вихідної електричної потужності ВЕУ з ВВО від швидкості вітру

На рис 1.10 виділено 4 зони. Через малу швидкість вітру в зоні 1 ВЕУ не стартує, а починає працювати, генеруючи на виході електроенергію зі швидкості вітру $V_{\text{в.min}}$, яка називається стартовою швидкістю і, переважно, становить 3-4 м/с. У діапазоні швидкостей вітру від $V_{\text{в.min}}$ до номінальної швидкості вітру $V_{\text{в.н}}$ (зона керування 2) ВЕУ працює з неповним навантаженням, і лише за швидкості вітру $V_{\text{в.н}}$ вихідна потужність ВЕУ досягне свого номінального значення $P_{\text{ВЕУ.н}}$, на яке розрахований електричний генератор. У діапазоні від $V_{\text{в.н}}$ до швидкості вітру $V_{\text{в.max}}$, яка називається стартовою швидкістю (зона керування 3), необхідно обмежувати вихідну електричну потужність ВЕУ на номінальному рівні одним з можливих способів, які будуть описані в підрозділі 1.2.2. При збільшенні швидкості вітру понад $V_{\text{в.max}}$ спрацьовує гальмівна система ВЕУ, ВР перестає обертатися і, відповідно, зупиняється генерування електроенергії (зона 4).

Найчастіше завданням ідеального автоматичного керування роботою ВЕУ з ВВО з аеродинамічно пасивним ВР (нерухомими лопатями) на ділянці неповної потужності за низьких і середніх значень швидкості вітру є забезпечення такого оптимального електричного навантаження ВЕУ, щоб ВР увесь час обертався з оптимальною, пропорційною до швидкості вітру кутовою швидкістю відповідно до (1.15) та працював у ТМВП (англійською це керування МРРТ – Махітит Power Point Tracking) [46, 108, 113]. Проте не відбір максимальної потужності від вітру є метою роботи ВЕУ, а отримання максимальної вихідної електричної потужності, значення якої залежатиме й від втрат на перетворення та передачу енергії [34]. Тому завданням оптимального керування на ділянці неповної потужності ВЕУ має бути максимальне наближення в статичних і динамічних режимах роботи до кривої вихідної потужності (рис. 1.10), що й застосовано в низці досліджень [45, 88, 125, 154].

Завданням автоматичного керування роботою ВЕУ на великих швидкостях вітру (V_{в.н}... V_{в.max}) є обмеження вихідної електричної потужності на рівні значення, передусім, для СГПМ, що унеможливлює номінального його Обмеження пов'язані також з допустимими механічними перегрівання. навантаженнями на ВР з ВВО. Найпоширенішим способом обмеження вихідної потужності ВЕУ з аеродинамічно пасивним Н-ротором на ділянці високих швидкостей вітру є так зване активне stall-регулювання [134]. При збільшенні швидкості вітру понад $V_{\text{в.н}}$ чи кутової швидкості ВР понад $\omega_{\text{opt.h}} = (\lambda_{\text{opt}}/r)V_{\text{в.h}}$ в залежності від способу керування САК повинна різко збільшити електричне навантаження генератора, так, щоб кутова швидкість ВР знизилася, і він почав відбирати від вітру енергію з меншою потужністю. Робочі точки ВР при швидкостях вітру, що перевищують V_{в.н} = 10 м/с, показано на рис. 1.8 і 1.9. Для

роботи в режимі обмеження потужності ВЕУ можна реалізувати різні закони керування, які розглянемо в підрозділі 1.2.2.

У деяких роботах між зонами керування 1 та 2 вводять ще одну досить вузьку зону керування – перехідну, яка дає змогу на турбулентних вітрах високих швидкостей плавно переходити з однієї зони в іншу, не створюючи значних механічних навантажень на ВР і коливань електричної потужності на виході ВЕУ [60, 154].

1.2. Системи автоматичного керування роботою малих автономних ВЕУ

Система автоматичного керування (САК) – одна з основних, від якості роботи якої безпосередньо залежать енергетична ефективність, надійність і термін служби ВЕУ. Завдання автоматичного керування роботою ВЕУ пов'язані із забезпеченням основних режимів її роботи відповідно до рис. 1.10 і є такими [45, 93, 154]:

• прийняття рішення про запуск ВР (у випадку його самостійного старту – про початок генерування електроенергії) за швидкості вітру V_{в.min};

• максимізація вихідної електричної потужності в зоні 2 – діапазоні неповного навантаження за швидкостей вітру V_{в.min} … V_{в.н};

• обмеження вихідної електричної потужності в зоні 3 – діапазоні номінального навантаження за швидкостей вітру V_{в.н} … V_{в.max};

 зупинка ВР в зоні 4 – за швидкостей вітру, що перевищують значення V_{в.max}.

Окрім цих основних завдань, САК може виконувати й низку додаткових: зниження механічних навантажень на конструктивні елементи ВР [86], керування нагромадженням і споживанням генерованої електроенергії [77], забезпечення параметрів якості електроенергії в мережі (так зване кондиціювання електричної енергії) тощо. 1.2.1. Системи оптимального керування неповним електричним навантаженням СГПМ енергії в автономних ВЕУ. У режимі неповного навантаження (зона керування 2 на рис. 1.10) ВЕУ працює переважну тривалість робочого часу, генеруючи при цьому електроенергію з невеликою потужністю. Звідси – надзвичайно високі вимоги до якості роботи САК і величезна кількість досліджень, спрямованих на її забезпечення. У низці оглядових наукових публікацій [45, 68, 69] і монографій [60, 134] на цю тему такі САК класифікують по-різному. Аналіз цих й інших робіт дав змогу розрізнити значну кількість класифікаційних ознак:

- за типом керування пасивне, активне, активно-пасивне;
- за наявністю давачів швидкості вітру давачеві та бездавачеві;

• за наявністю інформації про робочі характеристики складових елементів ВЕУ – ВР (характеристика $C_P(\lambda)$, точка максимуму потужності $C_{Pmax}(\lambda_{opt})$, оптимальна швидкохідність λ_{opt}), генератора (залежність ККД від потужності та кутової швидкості), ВЕУ (крива потужності $P_{BEY}(V_B)$), без потреби будь-якої інформації;

• за принципом автоматичного регулювання – за збуренням, за відхиленням, комбіноване, інтелектуальне;

• за математичним описом і відповідними методами керування – лінеаризовані, нелінійні.

Більшість САК оптимального керування роботою ВЕУ в зоні 2 розроблено для ВЕУ великих потужностей. Як об'єкт керування такі ВЕУ складніші від малопотужних, оскільки мають додаткові ступені вільності, пов'язані з керуванням кутом атаки лопатей, положенням вітроколеса відносно вітру, складною багатоступінчастою механічною передачею, пружністю довгих лопатей тощо [60, 134]. Відповідно й складність та вартість САК є високими. Для малопотужних ВЕУ з ВВО, особливо прямопривідних з пасивним Н-ротором, з технічної та економічної точки зору доцільно максимально спростити САК.

Найпростішими САК є пасивні. У них керування відбувається автоматично шляхом зростання навантаження СГПМ при збільшенні швидкості вітру. Для
цього необхідно оптимізувати параметри ВР, генератора та навантаження як однієї системи [152]. Звісно, через різні закони зміни координат ВР і СГПМ добитися високих енергетичних показників у пасивній системі керування не вдається. Дещо кращі показники характеризують ВЕУ з пасивним керуванням, у якій СГПМ має дві чи три обмотки якоря, навантажені через дроселі паралельно на спільний діодний міст з АБ [74, 87, 163]. Активні САК регулюють електричне навантаження СГПМ за допомогою силових напівпровідникових перетворювачів (рис. 1.15) і можуть забезпечувати високі показники в усіх режимах роботи ВЕУ. Задовільних регулювальних характеристик ВЕУ можна досягнути, комбінуючи пасивне й активне керування, при цьому суттєво знизиться потужність і вартість силового перетворювача [156].

Точні давачі швидкості вітру – анемометри – дорогі. Їх необхідно встановлювати на значній віддалі від ВР, щоб міряти швидкість незбуреного вітрового потоку. В умовах турбулентних швидкозмінних за напрямом вітропотоків навіть точний давач швидкості вітру не відображатиме її реальної величини для ВР. Усе це зумовлює доцільність застосування бездавачевих САК. Оскільки найкращим з точки зору відображення реального вітропотоку, що омиває ВР, є сам ВР, він може слугувати первинним давачем швидкості вітру [80]. На цьому принципі побудовано низку естиматорів, які обчислюють швидкість вітру на підставі відомих параметрів складових ВЕУ та виміряних електричних координат роботи: потужності на виході генератора, кутової швидкості (частоти напруги) тощо [76].

Найлегше побудувати САК оптимального навантаження генератора ВЕУ, якщо відомі робочі характеристики ВР. Три основні структури таких САК: керування за оптимальною швидкохідністю ВР (TSR-control), керування за оптимальним моментом ВР (Optimal Torque Control – OTC) і керування за оптимальною потужністю ВР (Optimal Power Control – OPC) [45, 69, 80].

САК за оптимальною швидкохідністю ВР (рис. 1.11) належить до давачевих систем, оскільки спирається на вимірюванні швидкості вітру, за якою для оптимальної швидкохідності ВР λ_{opt} формується на основі (1.14) завдання на

оптимальну кутову швидкість ВР з генератором ω_{opt} . Це завдання відпрацьовується в замкненій за кутовою швидкістю САР з відповідним регулятором (найчастіше ПІ) [80, 129]. Система відзначається високою швидкодією, проте їй властиві всі вищеназвані недоліки давачевих САК.

Обидві САК – ОТС та ОРС (рис. 1.12) – є бездавачевими, причому першу з них вважають базовою, стосовно якої оцінюють усі інші системи керування [1, 45, 125]. У принцип їхньої роботи покладено такі закони оптимального навантаження ВР, які легко отримати на підставі виразів (1.10), (1.11) та (1.14) і відобразити відповідними кривими M_{opt} та P_{max} на рис. 1.8 та 1.9:

$$M_{\rm BP\,opt} = \frac{1}{2} \rho_{\rm n} A C_{\rm P\,max} \left(\frac{r}{\lambda_{\rm opt}}\right)^3 \omega_{\rm opt}^2 = k_{\rm M} \omega_{\rm opt}^2, \qquad (1.16)$$

$$P_{\rm BP\,max} = \frac{1}{2} \rho_{\rm n} A C_{\rm P\,max} \left(\frac{r}{\lambda_{\rm opt}}\right)^3 \omega_{\rm opt}^3 = k_{\rm M} \omega_{\rm opt}^3, \qquad (1.17)$$

де
$$k_{\rm M} = \frac{1}{2} \rho_{\rm m} A C_{\rm P max} \left(\frac{r}{\lambda_{\rm opt}} \right)^3 = \text{const.}$$

Працюють дві вказані САК аналогічно, тому їхню роботу достатньо пояснити на прикладі однієї з них – ОТС (рис. 1.12, а).

Пропорційно до квадрату поточної величини кутової швидкості генератора ω , яку вимірюється відповідним давачем чи обчислюється через електричні змінні генератора (частоту, напругу), за виразом (1.16) формуємо завдання на електромагнітний момент генератора, яке відпрацьовує замкнута САР моменту з відповідним регулятором. При такому керуванні створюваний генератором момент навантаження ВР буде меншим за оптимальний при конкретній швидкості вітру $V_{\rm B}$, якщо кутова швидкість ω буде нижчою, ніж оптимальна $\omega_{\rm opt} = \lambda_{\rm opt} V_{\rm B}/r$. І навпаки, момент навантаження ВР буде більшим за оптимальний, якщо кутова швидкість генератора буде вищою, ніж оптимальна.



Рис. 1.11. Блок-схема давачевої структури оптимального керування за кутовою швидкістю (швидкохідністю) ВР



Рис. 1.12. Блок-схеми бездавачевих структур оптимального керування за: а) моментом (ОТС), б) потужністю (ОРС)

В обох випадках це призводитиме до відповідного зростання чи спадання кутової швидкості генератора з ВР ω і прямування останньої до оптимального для конкретної швидкості вітру значення ω_{opt} , де ВР працюватиме у точці максимуму залежності $C_P(\lambda)$. Замкнена САР може бути реалізована не тільки за моментом, який важко виміряти, а й за іншими координатами, що формують електромагнітний момент, наприклад, за струмами генератора.

При ОРС сформоване за (1.17) завдання на максимальну потужність ВР треба зменшити на величину втрат потужності у генераторі, оскільки САР потужності замкнена за величиною електричної потужності на виході генератора. Для здійснення такої корекції завдання необхідна інформація про залежність ККД генератора від потужності його електричного навантаження за різних значень кутової швидкості [88, 154]. Це ускладнює роботу системи, тому базову САК переважно й застосовують за оптимальним моментом ВР.

Керування в структурах ОТС й ОРС відбувається фактично за принципом регулювання за збуренням швидкості вітру і завжди забезпечує асимптотичну стійкість САК і прямування до оптимальної точки механічної рівноваги без перегулювання [3]. З одного боку, це перевага таких нелінійних САК, порівняно з регулюванням за відхиленням, реалізованим в TSR-control (рис. 1.11). В останній існує проблема оптимального налаштування регулятора швидкості в усьому робочому діапазоні кутових швидкостей ВР, яку можна вирішити, застосувавши адаптивний принцип керування – зміну налаштування ПІ-регулятора швидкості в залежності від швидкості вітру [80]. Натомість, керування за збуренням має малу швидкодію [42], що особливо проявляється в малопотужних ВЕУ при роботі за низьких швидкостей вітру. В роботі [136] провели порівняння вищевказаних структур САК ВЕУ й віддали перевагу структурі ОТС, оскільки вона дає змогу генерувати більше електроенергії та забезпечує плавну зміну потужності при роботі на турбулентних вітрах.

У залежності від типу силового напівпровідникового перетворювача три вищевказані структури мають різні модифікації. Так, при застосуванні DC-DC перетворювача для структури OPC оптимальні робочі точки BEУ з врахуванням втрат у генераторі визначають не за вихідною потужністю, а за отриманою характеристикою $U_{DC.opt}(V_B)$ [109, 154]. При застосуванні АВН для структури ОТС реалізують зворотний зв'язок не за моментом, а за струмами якоря генератора. Тоді при векторному керуванні за ЕРС в залежності від конструкції генератора необхідно брати різні складові вектора струму: поперечну I_q , якщо постійні магніти розташовані на поверхні ротора [176] та оптимальне поєднання поздовжньої I_d та поперечної I_q складових з точки зору мінімуму втрат в генераторі [95, 125]. При прямому керуванні моментом СГПМ (DTC – Direct Torque Control) електромагнітний момент обчислюється відповідним естиматором [44].

Системи на базі DC-DC перетворювача, безумовно, простіші й дешевші, порівняно з тими, що застосовують ABH. Проте останні мають суттєві переваги: формують синусоїдальні струми в обмотці якоря СГПМ та одиничний $\cos\varphi$, що знижує втрати в обмотці якоря; забезпечують двонапралену передачу енергії та роботу СГПМ в режимі двигуна для запуску ВР.

Дуже мало досліджень і розробок САК враховують вплив зміни такого дієвого фактору, як температура повітря на робочі характеристики ВЕУ [55]. А вплив швидкості вітру на аеродинамічні характеристики ВР внаслідок зміни числа Рейнольдса (1.9) в роботі САК взагалі не враховували.

Принципово іншу групу САК неповного навантаження ВЕУ складають пошукові системи екстремального керування, які фігурують у літературі під абревіатурами Р&O (Perturbation and Observation), HCS (Hill-Climb Searching) та ін. [45, 63, 99, 113]. Ці системи реалізують математичні оптимізаційні процедури з пошуку точок екстремуму (максимуму вихідної електричної потужності ВЕУ) функцій. Метод полягає у здійсненні невеликих збурень (perturbing) з певним кроком контрольованої змінної та спостереженні (observing) за реакцією цільової функції системи на це збурення доти, доки ця реакція не зменшиться до нуля. Зазвичай, збурюють одну з електричних координат, змінюючи щілинність імпульсного керування напівпровідниковим перетворювачем, що призводить до зміни струму чи напруги навантаження генератора. Метод Р&О не потребує ніякої інформації про характеристики ВР і генератора, простий і дешевий. Проте він має малу швидкодію при раптових змінах швидкості вітру, особливо при великих значеннях моменту інерції ВР. Тут на перший план виступає вибір раціонального значення кроку, що є непростою задачею [82]. Великий крок здійснює швидку зміну, проте призводить до коливань навколо точок максимуму, положення яких постійно змінюється (рис. 1.13, а). Малий крок зменшує швидкість пошуку максимуму (рис. 1.13, б) [69]. В обох випадках це знижує енергетичну ефективність роботи ВЕУ на турбулентних вітрах. Ще одна проблема пошукових систем – це визначення правильного напрямку здійснення збурення, оскільки на реакцію системи паралельно впливає також неконтрольована зміна іншого збурення – швидкості вітру (рис. 1.13, в) [45].





Для вирішення цих проблем запропонована низка заходів, реалізованих за відповідними логічними алгоритмами, що ускладнює процедуру пошуку та зменшує його швидкодію. У роботі [112] проведено порівняльні симуляційні дослідження роботи ВЕУ потужністю 5 кВт з САК, що працюють за різними методами: TSR-control, OPC та P&O. Результати показали суттєво нижчу швидкодію останнього.

Нещодавно запропоновано нові пошукові методи МРРТ, які відзначаються високою швидкодією [46, 111]. У них пошук розбито на дві стадії: на першій здійснюється великий крок у напрямку ймовірного максимуму, а на другій відбувається традиційний HCS. Для цього часто застосовують й інтелектуальні системи керування [176].

Низку проблем з оптимального керування роботою ВЕУ можна вирішити, застосувавши інтелектуальні методи керування.

Нечітке керування (Fuzzy-Logic Control – FLC) може допомогти з параметричною невизначеністю, наявністю шумів, адаптацією до зміни умов роботи [79, 84, 100, 112, 161, 174]. Так, у роботі [160] для керування однією ВЕУ застосовано три нечіткі регулятори: FLC1 для пошуку MPP, FLC2 для пошуку робочої точки генератора з мінімумом втрат і FLC3 для обмеження коливань моменту та генерованої потужності електричної енергії, яку віддають у мережу. В іншому дослідженні FLC здійснює функцію корекції коефіцієнтів ПІ-регулятора швидкості при різних швидкостях вітру [77]. Нечітка адаптивна модель Takagi–Sugeno–Kang застосована в системі MPPT разом з генетичними алгоритмами в роботі [84]. Цілком просте рішення знайдено в роботі [79], де нечіткий регулятор виконує функцію MPPT замість ПІ-регулятора, що забезпечує параметричну нечутливість й адаптивність.

Штучні нейронні мережі (Artificial Neural Network – ANN) дають змогу реалізувати досить точний естиматор швидкості вітру, вимірюючи вихідну потужність і кутову швидкість генератора [76]. ANN застосовують також і для МРРТ, поєднуючи з іншими методами, наприклад, з HCS у малопотужній ВЕУ для пошуку оптимального значення U_{DC} [120]. У роботі [117] разом з

оптимізаційною процедурою PSO (Particle Swarm Optimization) застосовано дві ANN, які після відповідного навчання відтворюють за кутовою швидкістю і вихідною потужністю генератора швидкість вітру та сигнал оптимального керування DC-DC перетворювачем.

У гібридних САК комбінують різні методи керування так, щоб переваги одних усунули недоліки інших. Так, у роботі [82] базовий метод ОТС пов'язаний з НСЅ для вирішення двох традиційних для пошукових САК проблем: знаходження компромісу між енергетичною ефективністю та швидкодією пошуку й визначення правильного напрямку пошуку максимуму при швидких змінах вітру. Часто поєднують також інтелектуальні методи керування з класичними лінійними для покращення роботи останніх [48].

Перспективним, на наш погляд, є застосування нечіткої логіки як складової гібридної САК для врахування впливу умов роботи ВР (температури повітря, залежності *C*_P від швидкості вітру) на його аеродинамічні характеристики, а отже, й енергетичні показники роботи ВЕУ.

При синтезі САК у переважній кількості робіт нелінійні динамічні системи ВЕУ лінеаризують у відповідних точках і застосовують класичні методи керування лінійними системами, найчастіше метод підпорядкованого керування координатами [134, 165]. У деяких дослідженнях застосовано складні методи керування нелінійними системами: адаптивне керування [11, 17, 111], ковзне керування [58], feedback linearization control [62, 67], керування на основі енергетичних підходів (passive based control, port-controlled Hamiltonian control) [4]. Проте для малих ВЕУ з ВВО такі підходи не завжди виправдані через значну складність і високу вартість реалізації.

1.2.2. Системи обмеження максимального електричного навантаження **ВЕУ за великих вітрів.** У зоні 3 кривої вихідної потужності ВЕУ (рис. 1.10) необхідно обмежити потужність ВР і СГПМ на допустимому рівні. У потужних НАWT для цього застосовують активне pitch-керування, розвертаючи лопаті задля їхньої меншої взаємодії з повітряним потоком [20, 60]. У деяких малопотужних

VAWT теж застосовують pitch-керування лопатей або спеціальні додаткові пластини, які піднімають на великій швидкості ВР і створюють додатковий аеродинамічний опір [176]. Проте це суттєво ускладнює ВЕУ і знижує надійність її роботи в складних метеорологічних умовах.

У ВЕУ з ВВО та пасивним ВР (особливо зі швидкохідним Н-ротором) теж можна досягнути подібного ефекту за допомогою САК, яка через відповідне регулювання навантаження генератора та швидкості ВР зміщує робочу точку ВР так, щоб він захоплював менше потужності вітрового потоку. При цьому можливі два напрямки регулювання, яким відповідають дві пологі частини кривої $C_{\rm p}(\lambda)$ (рис. 1.7), що лежать по різних сторонах від оптимальної швидкохідності λ_{opt} . Якщо зі збільшенням швидкості вітру зменшувати кутову швидкість BP, то λ знижуватиметься, зменшуючи коефіцієнт потужності Ср. Це так зване пасивне stall-регулювання [60, 134]. За відповідної роботи САК можна забезпечити стабілізацію потужності ВР, зменшивши його кутову швидкість і збільшивши механічний момент. Якщо ж зі збільшенням швидкості вітру дати змогу ВР обертатися зі значно вищою кутовою швидкістю так, щоб його швидкохідність суттєво перевищувала λ_{opt} , то теж можна забезпечити стабілізацію потужності, але вже навпаки – завдяки зменшенню механічного моменту ВР. Такий режим роботи ВР має назву feathering-регулювання [134, 154]. Зважаючи на те, що нахил кривої $C_{\rm p}(\lambda)$ є більшим у сторону зменшення швидкохідності, особливо ДЛЯ швидкохідних Н-роторів, перевагу надають stall-регулюванню. Проте в науковій літературі дуже мало робіт з розроблення та дослідження роботи САК ВЕУ в режимах пасивного stall-регулювання. Це, напевно, пов'язано з переважною роботою малопотужних ВЕУ в режимі неповного навантаження, а в рідкісних для цих ВЕУ режимах великих вітрів застосовують додаткове навантаження генератора на гальмівні опори чи накладають механічні гальма. Усе це знижує енергетичну ефективність малих ВЕУ.

На рис. 1.14 приведено залежності $P_{\rm BP}(\omega)$ та $M_{\rm BP}(\omega)$, розраховані за виразами (1.11), (1.12) та (1.14) з врахуванням (1.8), для ВЕУ потужністю 1 кВт за номінальної 10 м/с і більших від неї 11-13 м/с швидкостей вітру. Якщо обмежити

потужність ВР на номінальному рівні $P_{\rm H} = 1145$ Вт, як показано на рис. 1.14, а, то для цієї потужності отримаємо значення моменту ВР у зонах stall-регулювання $M_{\rm P,H1}$ і feathering-регулювання $M_{\rm P,H2}$ (рис. 1.14, б). Як видно з останнього, в зоні stall-регулювання значно зростає момент ВР, що повинно бути передбачено в його конструкції. Відповідно зростають і момент та струми СГПМ, що викликає додаткові втрати в обмотці якоря генератора. У зоні feathering-регулювання, навпаки, – момент і втрати в міді генератора зменшуються, проте значно зростає кутова швидкість ВР і генератора, що потрібно передбачити в конструкції ВЕУ.

Автоматичному керуванню, яке забезпечує режим обмеження потужності роботи ВЕУ шляхом активного stall-регулювання, приділена деяка увага в роботах [53, 154].

Керування роботою малої ВЕУ в праці [154] здійснюють, регулюючи постійну напругу U_{DC} на виході діодного моста, на який навантажено СГПМ. У режимі обмеження електричної потужності ВЕУ вступає в роботу швидкодіючий ПІ-регулятор. Він зменшує завдання на напругу U_{DC} , яку регулюється у замкненій системі зміною величини електричного навантаження СГПМ DC-DC перетворювачем. Для зменшення динамічних навантажень на ВР при переходах із зони 2 в зону 3 і навпаки автори застосували невелику перехідну зону, в якій напруга U_{DC} підтримується на максимальному рівні.

Проаналізовані системи обмеження потужності ВЕУ стосуються лише простої реалізації регулювання навантаження СГПМ DC-DC перетворювачем. У досконаліших системах на базі АВН структури САК обмеження потужності повинні бути іншими.

Отже, розроблення ефективних САК потужності малих VAWT на великих вітрах – ще не достатньо вирішене актуальне завдання.





Рис. 1.14. Розраховані характеристики ВР для ВЕУ потужністю 1 кВт при роботі на вітрах зі швидкостями, більшими за номінальну:
а) механічна потужність з обмеженням на номінальному рівні,
б) обертовий момент із зонами роботи за максимальної потужності на номінальному рівні

1.2.3. Системи керування процесом генерування теплової енергії в автономних ВЕУ. Генерування теплової енергії в малопотужних автономних ВЕУ може відбуватися як побічно, так і контрольовано. У першому випадку до генератора підключають опори навантаження для його гальмування чи просто скидання зайвої електричної енергії, коли немає достатньої потужності споживачів і ємності нагромаджувачів електроенергії. У другому випадку опорами навантаження служать ТЕН, які найчастіше нагрівають воду в бойлерах для опалення та/чи гарячого водопостачання. В обох випадках генеровану від вітру теплову енергію отримують з електричної – dump load (скинуте навантаження) [124, 165].

Порівняно невелику кількість досліджень присвячено способам реалізації та регулювання скинутої ВЕУ теплової потужності. Найчастіше це здійснюють або підключенням ТЕН через симісторний регулятор безпосередньо до обмоток СГПМ [92], через тиристорний перетворювач (випрямляч) [173] або через транзисторний сhopper (однотранзисторний DC-DC перетворювач) – до ланки постійної напруги [126]. В автономних ВЕУ регулювання відбувається так, що надлишкова електрична енергія перетворюється в теплову. В підключених до мережі ВЕУ dump load виконує функцію захисту інвертора, а також ВР від вітрів занадто великої швидкості.

У роботі [110] проведено аналіз низки таких способів регулювання резистивного навантаження СГПМ з точки зору їхньої енергетичної ефективності, пов'язаної з втратами енергії в обмотках якоря генератора через генерування гармонік струму навантаження. Автори запропонували найкращу В енергетичному плані схему з низьким рівнем вищих гармонік (рис. 1.15). Транзистор VT, який за допомогою ШІМ періодично закорочує вихід діодного моста VDM, таким чином комутує трифазне резистивне навантаження $R_{\rm H}$. Завдяки L-С фільтру, що складається з обмоток якоря СГПМ і конденсаторів С з оптимально підібраною ємністю, струми в обмотках якоря генератора мають близьку до синусоїди форму та близький до одиниці cos *q*.



Рис. 1.15. Принципова схема системи регулювання резистивного навантаження СГПМ [20]

У роботі [73] пропонують ВЕУ з ВВО, яка призначена лише для виробництва теплоти для нагрівання води. У ній застосовано ВР Савоніуса, який через ланцюгову передачу приводить у рух СГПМ. Кожна з трьох фаз обмотки якоря навантажена на свій ТЕН, причому їхні потужності співвідносяться між собою, як 1:2:3. ТЕН найменшої потужності підключено безпосередньо до одної фазної обмотки, а інші – через твердотільні реле. Останні автоматично вмикаються при досягненні струмом попередньої працюючої фази деякого заданого значення. Таким простим способом здійснюється квазіоптимальне регулювання навантаження СГПМ в усьому робочому діапазоні зміни швидкості вітру.

На відміну від попередніх способів, у яких теплоту отримують з генерованої ВЕУ електричної енергії, в роботі [107] пропонують ВЕУ з ВВО, яка безпосередньо перетворює механічну енергію ВР у теплову енергію теплоносія (рис. 1.16). Для цього застосовано машину Джоуля, яка працює за принципом перетворення механічної енергії руху молекул рідини в теплоту. Рух рідини здійснюють міксером, безпосередньо з'єднаним з валом ВР.

Оскільки запропонований вітровий теплогенератор є практично нерегульований, то енергетична ефективність його роботи залежить від вдалого поєднання аеродинамічних характеристик ВР з гідродинамічними характеристиками міксера. Виходячи з цього, у вказаній роботі математичним моделюванням аеро- та гідродинамічних процесів і комп'ютерним симулюванням роботи вітрового теплогенератора знайдено його раціональні параметри, що дало змогу отримати задовільні характеристики цієї установки.



Рис. 1.16. Вітровий теплогенератор [107]

Упродовж останнього часу спостерігаємо перехід до децентралізованого генерування та споживання електроенергії в порівняно малих, але так званих розумних мережах (smart grid) [177]. Значний акцент у цих мережах ставлять на генерування електроенергії з поновлюваних джерел енергії переважно від вітру та сонця [175]. Порівняно мала потужність цих мереж і наявність досить потужних джерел генерування зі стохастичною природою (ВЕУ, фотоелектричні станції) зумовлюють їх вразливість щодо стійкої роботи. Тому для вирівнювання графіків генерування електроенергії, а також максимального використання енергії поновлюваних джерел ВЕУ комбінують з нагромаджувачами та споживачами акумуляторами, енергії різної природи: тепловими тепловими помпами, пневматичними акумуляторами, виробництвом метану, електролізом води та отримання водню тощо [85, 96, 178]. Серед цих нагромаджувачів основне місце

займають теплові акумулятори, оскільки завжди є потреба в гарячому водопостачанні.

Розвиток мікроТЕЦ спричинив новий науково-технічний напрямок – комбіноване генерування електричної та теплової енергії (СНР – Cobine Heat-Power generation) [83, 122]. Ця тенденція когенерації поступово поширюється й на малу автономну вітроенергетику, оскільки окремі споживачі теж мають постійну потребу як в електричній, так і в тепловій енергії [153, 172]. Дослідженням, спрямованим на комбіноване електро-, тепло- та водопостачання окремих споживачів завдяки використання поновлюваних джерел енергії, присвячено низку вітчизняних праць [18, 24], що свідчить про актуальність цього перспективного напрямку. Для його розвитку необхідно шукати принципово нові технічні рішення, які б сприяли розширенню функціональних можливостей ВЕУ, підвищенню їхньої енергетичної ефективності та зменшенню терміну окупності.

1.3. Висновки до розділу

Проведений аналіз процесів і систем керування генеруванням енергії в малопотужних автономних ВЕУ дає змогу зробити висновки, які окреслюють перспективні шляхи вдосконалення цих ВЕУ.

1. Специфічні умови розміщення та роботи малопотужних ВЕУ зумовлюють цілком інші вимоги до їхньої конструкції та відмінність перебігу процесів генерування енергії порівняно з уже традиційними ВЕУ великої потужності.

2. Виходячи з обґрунтованої концепції побудови малопотужних ВЕУ з ВВО як основні конструкційні рішення варто взяти такі: швидкохідний Н-ротор (2-3-лопатевий), безредукторна трансмісія, багатополюсний СГПМ, АВН.

3. САК повинна забезпечити ефективну роботу ВЕУ (статичну точність і швидкодію керування) в усіх основних її режимах: оптимальне керування в зоні 2 неповного навантаження ВЕУ, стабілізація потужності ВЕУ на номінальному

рівні в зоні 3 повного навантаження, м'якість (обмеження механічних навантажень) при переході із зони 2 в зону 3 і навпаки.

4. Систему оптимального керування навантаженням СГПМ в зоні 2 доцільно будувати як бездавачеву за гібридним принципом на основі базової системи ОТС з додатковими заходами щодо підвищення швидкодії керування та з врахуванням зміни умов роботи ВЕУ.

5. Для електротеплових малопотужних ВЕУ доцільно застосовувати прості САК окремих підсистем, оскільки збільшення кількості ступенів вільності системи забезпечує ширші можливості комбінованого керування.

Отже, на основі проведеного аналізу можна стверджувати, що актуальними для вирішення у цій роботі є такі завдання:

1. Розробити математичні та комп'ютерні моделі всіх підсистем, що описують роботу малопотужних автономних ВЕУ на турбулентних вітрах, та провести симуляційні дослідження особливостей роботи цих ВЕУ.

2. Удосконалити систему оптимального керування роботою підсистеми генерування електричної енергії автономної ВЕУ в напрямку підвищення її енергетичної ефективності, мінімізуючи сумарні аеродинамічні й електричні втрати енергії з врахуванням впливу на роботу ВР швидкості вітру й температури повітря.

3. Розробити та дослідити структури систем керування обмеженням потужності малих ВЕУ за їхньої роботи на вітрах з великою швидкістю.

4. Створити та дослідити системи електротеплових ВЕУ, які поєднують високу енергетичну ефективність з простотою конструкції та низькою вартістю.

5. Розробити та дослідити енергоефективну систему керування когенераційною ВЕУ, яка забезпечує гнучке керування генерованими потужностями електричної й теплової енергії, а також енергетичний менеджмент акумуляторних батарей.

6. Створити електромеханічний симулятор роботи ВР на турбулентному вітрі, з допомогою якого експериментально дослідити макетні взірці запропонованих систем керування електротепловими ВЕУ.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ СИМУЛЮВАННЯ РОБОТИ ВЕУ 3 ГЕНЕРУВАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ Й ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

У розділі розроблено математичні та комп'ютерні моделі всіх підсистем ВЕУ з ВВО та прямопривідним СГПМ. При цьому враховано нові фактори: вплив температури повітря, залежність аеродинамічних характеристик ВР від швидкості вітру. Для керування навантаженням генератора застосовано АВН з векторним керуванням і базову систему оптимального керування моментом СГПМ. Отримано нові характеристики динамічної системи «ВР – генератор з оптимальним керуванням». Здійснено цикл порівняльних досліджень комп'ютерним симулюванням роботи ВЕУ різної потужності на турбулентному вітрі.

Основні результати розділу опубліковано в роботах автора [21, 36, 42].

2.1. Обґрунтування структури дослідної ВЕУ

Як 1, найкращими в розділі характеристиками роботи показано малопотужних ВЕУ на переважно низькошвидкісних турбулентних вітрах відзначаються BEV з BBO, в яких застосовано високошвидкісний BP Дар'є, наприклад, трилопатевий Н-ротор. Для нього доцільно застосувати безредукторну трансмісію та тихохідний багатополюсний СГПМ. Найбільш ефективно як з енергетичної точки зору, так і щодо якості автоматичного керування можна напівпровідниковим формувати електричне навантаження СГПМ ABH (рис. 1.5, б). При цьому необхідно застосувати векторне керування проекціями струму якоря генератора в обертовій з його ротором системі координат dq, зорієнтованій віссю *d* у напрямку потоку пари полюсів постійних магнітів [61]. Загальну функціональну схему автономної ВЕУ з ВВО наведено на рис. 2.1. До складу силового енергетичного каналу системи входять ВР, СГПМ, АВН мостового типу на IGBT транзисторах, АБ і коло навантаження, під'єднане паралельно до АБ.



Рис. 2.1. Загальна функціональна схема дослідної системи автономної ВЕУ з ВВО

Для проведення базових досліджень, необхідних для порівняння з новими вирішеннями, що будуть представлені в наступних розділах, застосована основна найбільш поширена система оптимального керування моментом СГПМ – ОТС [45, 69]. Система керування реалізована на мікроконтролері МК, до якого підключені: абсолютний багатоточковий давач положення ротора – енкодер Е, давачі швидкості вітру $V_{\rm B}$ і температури повітря \mathcal{G} з меорологічної станції, а також три давачі фазних струмів генератора ДС, реалізовані, наприклад, на ефекті Холла. Енкодер забезпечує поточне значення кутового положення ротора θ , необхідне для перетворення координат струму якоря, а також значення кутової швидкості ВР і СГПМ, необхідне для побудови САК. Система керування ABH – векторного типу, з формуванням узагальненого вектора струму якоря генератора за напрямком вектора його узагальненої ЕРС, тобто фазні струми генератора повинні співпадати за фазою з відповідними фазними ЕРС. Для найпростішого у виготовленні СГПМ, з розміщеними на поверхні ротора постійними магнітами, таке векторне керування забезпечує також мінімум втрат енергії в міді обмоток якоря. Керування забезпечує завдання нульового значення проекції струму якоря електромагнітного $I_{\rm d},$ тоді значення моменту ЯК генератора прямо пропорціональне величині складової струму якоря *I*_a. Автоматичне регулювання цих складових фазних струмів найпростіше здійснити вже в перетворених з обертових фазних координатах I_a, I_b, I_c за допомогою замкнених контурів регулювання з гістерезисними регуляторами струмів ГРС. Таке векторне керування навантаженням генератора забезпечує в усталених і перехідних режимах синусоїдальність лінійних струмів якоря СГПМ і значення $\cos \varphi = 1$, що суттєво знижує втрати енергії в обмотках генератора, особливо при середніх і високих швидкостях вітру.

На рис. 2.2 приведено загальну комп'ютерну модель дослідної ВЕУ, яку розроблено в середовищі MATLAB/Simulink відповідно до функціональної системи, показаної на рис. 2.1. Основні складові цієї моделі такі:

- Turbulence Wind Subsystem підсистема турбулентного вітропотоку;
- Wind Turbine Subsystem підсистема ВР;
- Permanent Magnet Synchronous Machine підсистема СГПМ;
- Control Subsystem підсистема векторного керування АВН із системою керування ВЕУ;
- Voltage convertor перетворювач напруги, що імітує роботу АВН.

Математичні та комп'ютерні моделі вказаних підсистем розроблено в наступних підрозділах.

На загальній комп'ютерній моделі, для кращого розуміння її структури, не показані всі блоки вимірювання координат, обчислення та показників роботи ВЕУ. Блок Mstart формує значний стартовий момент на валу ВР для швидкого його розгону до оптимальної швидкохідності.



Рис. 2.2. Загальна комп'ютерна модель дослідної ВЕУ

2.2. Розроблення математичних і комп'ютерних моделей основних підсистем ВЕУ

2.2.1. Підсистема турбулентного вітропотоку. Швидкість турбулентного вітру описуємо як суму середньої $V_{\text{в.сер}}$ і змінної швидкості вітру $\tilde{V}_{\text{в}}(t)$ (турбулентної складової):

$$V_{\rm B}(t) = V_{\rm B.cep} + \widetilde{V}_{\rm B}(t) \,. \tag{2.1}$$

Значення середньої швидкості вітру можна задавати в експериментах сталими або плавно змінювати їх за довільним законом.

Математичний опис швидкості вітру можна здійснити за часовим та способами. Поширенішим є другий спосіб, спектральним для якого за досліджень результатами тривалих експериментальних розроблено низку математичних моделей. Найбільш відомою серед них є модель Ван дер Говена(Van der Hoven) [137], яка показує розподіл гармонік швидкості вітру в діапазоні від 0,0007 до 900 циклів на годину, тобто більше, ніж 6 декад (рис. 2.3). Як видно з рис. 2.3, спектральна густина потужності вітру $S_{yy}(f)$ має яскраво виражені максимуми в діапазонах низької та високої частоти, тобто для відносно постійної (V_{в.сер}) і турбулентної складових.



Рис. 2.3. Спектральна модель потужності вітру за Ван дер Говеном [137]

Проте, як показано в [138], при моделюванні високотурбулентних вітрів середні відхилення швидкості вітру, отримані за згаданою моделлю, практично не залежать від значення середньої швидкості вітру, що не відповідає дійсності. Щоб усунути цей недолік, у [138] модель Ван дер Говена використано лише для моделювання низькочастотної компоненти турбулентності, а для моделювання високочастотної компоненти застосовано спектральну густину потужності вітру, отриману фон Карманом (von Karman). Такий комбінований підхід дав змогу отримати достовірні результати швидкості турбулентного вітропотоку, проте вихідна математична модель є занадто складна.

Достатню точність і водночас простоту забезпечує підхід, використаний у моделі Каймала (Kaimal), відповідно до якої спектральна густина потужності вітру $S_{vv}(f)$ у всьому частотному діапазоні залежить від ступеня турбулентності вітру та описується такою залежністю [78]:

$$\frac{f S_{\rm vv}(f)}{\sigma^2} = \frac{\frac{f X_{\rm L}}{V_{\rm B.cep}}}{\left(1+1.5\frac{f X_{\rm L}}{V_{\rm B.cep}}\right)^{5/3}},$$
(2.2)

де *σ* – залежне від ступеня турбулентності відхилення швидкості вітру від середнього значення;

X_L – так звана турбулентна довжина – довжина місцевості, на якій згасає турбулентість (залежить від рельєфу).

Відносну інтенсивність турбулентності математично описує такий емпіричний вираз [78]:

$$I_{\rm B} = \frac{\sigma}{V_{\rm B,cep}} = \frac{I^* (a + 15/V_{\rm B,cep})}{a+1},$$
 (2.3)

де *I*^{*} – коефіцієнт, рівний 0,18 для високої турбулентності та 0,16 для низької;

а – коефіцієнт, рівний 2 або 3 відповідно для високої та низької турбулентності.

Розраховану за виразом (2.3) відносну інтенсивність турбулентності для вітрів з різними значеннями середньої швидкості показано на рис. 2.4.

Для заданої середньої швидкості вітру $V_{\text{в.сер}}$ і рівня турбулентності (низький чи високий) з (2.3) можна знайти σ , яке далі варто використати в залежності (2.2). Турбулентну довжину необхідно взяти відповідно до рельєфу місцевості: для горбистої місцевості $X_{\text{L}} = 500...600$ м, а для рівнинної – 100...200 м [78].

Для того, щоб отримати вираз для швидкості турбулентного вітропотоку у вузькій смузі частот Δf_i , функція спектральної густини $S_{vv}(f_i)$ виражається як

синус і косинус компонентів з випадково вибраною фазою ϕ_i (від 0 до 2π) на центральній частоті смуги f_i :

$$\widetilde{V}_i(t) = A_i \cdot \sin\left(2\pi f_i \cdot t\right) + B_i \cdot \cos\left(2\pi f_i \cdot t\right), \qquad (2.4)$$

де амплітуди гармонік рівні

$$A_i = A_{0i} \cdot \sin(\phi_i); \quad B_i = A_{0i} \cdot \cos(\phi_i),$$
 (2.5)

а

$$A_{0i} = \sqrt{\frac{1}{2} S_{vv}(f_i) \Delta f_i} . \qquad (2.6)$$



Рис. 2.4. Відносна інтенсивність турбулентності для вітрів з різними значеннями середньої швидкості

Тоді на підставі (2.1) математична модель турбулентного вітропотоку матиме вигляд

$$V(t) = V_{\text{B.cep}} + 2\sum_{i=1}^{m} (A_i \cdot \sin(2\pi f_i \cdot t) + B_i \cdot \cos(2\pi f_i \cdot t)), \qquad (2.7)$$

де m – кількість виділених інтервалів частоти Δf_i , на які розбита спектральна функція частоти $S_{vv}(f)$.

Для визначення параметрів математичних моделей вітропотоків розроблена комп'ютерна програма в середовищі Mathcad (Додаток А), яка дає змогу обчислювати коефіцієнти A_i , B_i для різних заданих частотних смуг Δf_i при різних середніх швидкостях вітру. Як показали наші дослідження, для достатнього відображення повного спектру турбулентного вітру достатньо взяти 8-10 смуг з частотного діапазону, обмеженого зверху максимальною потрібною в моделі частотою, а знизу – максимальним потрібним для моделювання часом симулювання.

Як приклад, побудовано математичну модель турбулентного вітру із середньою швидкістю 5 м/с, що діє на території з турбулентною довжиною 400 м. Для таких з рис. 2.4 отримуємо $I_{\rm B} = 0,3$ і далі з виразу (2.3) $\sigma = I_{\rm B}V_{\rm B.cep} = 1,5$ м/с. Обчислена з використанням цих результатів за виразом (2.2) функція спектральної густини потужності вітру показана на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Спектральна густини потужності вітру за середньої швидкості 5 м/с і високої турбулентності

Для проведення комп'ютерного моделювання в діапазоні 10 хвилин досить обмежити частоту з низької сторони на рівні $f = 1 \cdot 10^{-3}$ Гц. Відібрані 10 частот у діапазоні $f_j = 0,001...0,5$ Гц і розрахункові для них значення спектральної густини потужності турбулентного вітру $S_{vv}(f_j)$ записані у двох верхніх рядках табл. 2.1.

Між частотами f_j міститься n = 9 смуг частот Δf_i . Для кожної з них розраховано середні значення спектральної густини потужності турбулентного вітру $S_{vv}(f_i) = 0.5[S_{vv}(f_j) + S_{vv}(f_{j+1})]$, а з останніх за виразом (2.2) – центральну частоту f_i (табл. 2.1). В останньому рядку табл. 2.1 розраховано за виразом (2.6) коефіцієнти A_{0i} , необхідні для отримання амплітуд гармонік турбулентної швидкості вітру A_i , B_i .

Таблиця 2.1

<i>f</i> j, Гц	0,001		0,0	0,002)03	0,005		0,0	01	0,	02	0,05		0,1		0,3		0,5	
$S_{vv}(f_j)$	149,0		12	5,8	107,8		82	2,2	48	3,4	23,4		7,03		2,50		0,438		0,190	
i	1		1	2		3		4		-	5	6	5	7	7	8		9		
Δf_i , Гц		0,001		0,001		0,002		0,005		0,	0,01		0,03		05	0,2		0,2		
$S_{vv}(f_i)$		137,4		116,8		95,0		65,3		35,9		15,2		4,77		1,471		0,314		
<i>f</i> _i , Гц		0,00147		0,00247		0,00389		0,00698		0,014		0,028		0,065		0,141		0,368		
<i>А</i> _{0<i>i</i>} ,м/с		0,2	262	0,2	242	0,3	308	0,4	-04	0,4	-24	0,4	78	0,3	45	0,3	384	0,1	77	

Результати розрахунку параметрів гармонік турбулентної складової швидкості вітру

На підставі виразів (2.4) і (2.7) з використанням результатів розрахунку, що представлені в табл. 2.1, створена комп'ютерна модель (рис. 2.6) у середовищі MATLAB/Simulink, в якій можна задати середню швидкість вітру в блоці Vser і генерується турбулентний вітропотік. Випадкові значення фаз ϕ_i формуються блоками генератора випадкових чисел Uniform Random Number на дев'ятьох різних частотах.

За описаною методикою були проведені розрахунки й отримано комп'ютерні моделі турбулентних вітрів з середніми швидкостями 3, 4 і 5 м/с і різним ступенем турбулентності.

Результат комп'ютерного моделювання турбулентного вітропотоку для середньої швидкості вітру 5 м/с протягом 400 с при високому коефіцієнті турбулентності представлено на рис. 2.7.



Рис. 2.6. Комп'ютерна модель швидкості вітру з турбулентною складовою (**Turbulence Wind Subsystem**)



Рис. 2.7. Осцилограма швидкості турбулентного вітропотоку для середньої швидкості вітру 5 м/с



Рис. 2.8. Залежності $C_{\rm P}(\lambda)$ при різних швидкостях вітру для досліджуваного ВР: а) загальний вигляд, б) фрагмент в околі точок максимуму

2.2.2. Підсистема ВР. Основна аеродинамічна характеристика ВР – безрозмірна залежність $C_{\rm P}(\lambda)$, яка лежить в основі виразів для потужності ВР (1.11) і його механічного моменту (1.12), визначає конструктивні особливості ВР і переважно не залежить від умов його праці. Надалі для моделювання $C_{\rm P}(\lambda)$ використаємо залежність (1.14), яка графічно представлена на рис. 1.7 і характерна для ВР Дар'є Н-типу.

Проте, як зазначено в підрозділі 1.1.4, останні дослідження [87, 88, 106] щораз частіше показують, що аеродинамічна характеристика ВР $C_{\rm P}(\lambda)$ змінюється зі швидкістю вітру за закономірністю, яку відображено для досліджуваного ВР сімейством кривих на рис. 2.8. У цьому сімействі крива, показана на рис. 1.7, відповідає швидкості вітру 6 м/с, а всі залежності описує вираз, отриманий на основі (1.14):

$$C_{\rm P}(\lambda, V_{\rm B}) = 1.14 \left(\frac{9.47}{\lambda} - 1\right) \exp \frac{-f(V_{\rm B})}{\lambda}, \qquad (2.8)$$

де $f(V_{\rm B}) = 0.003869V_{\rm B}^2 - 0.128V_{\rm B} + 6.627$.

Як видно з рис. 2.8, зі зміною швидкості вітру буде змінюватися робоча точка оптимальної з аеродинамічної точки зору роботи ВЕУ, оскільки змінюватимуться параметри $\lambda_{opt}(V_{\rm B})$ і $C_{\rm Pmax}(V_{\rm B})$.

Окрім цього, густина повітря ρ_{n} , яка визначає енергетичні показники роботи ВЕУ, залежить від температури повітря \mathcal{P} і його тиску, зумовленого, передусім, висотою над рівнем моря [55, 145]. Така залежність показана на рис. 2.9. Для висоти над рівнем моря 0 м температурну залежність густини повітря на підставі [168] можна описати виразом

$$\rho_{\rm II}(\vartheta) = 0,00001661\vartheta^2 - 0,004764\vartheta + 1,2924. \tag{2.9}$$

Залежність (2.9) разом з параметрами точки максимуму потужності $C_{\text{Pmax}}[\lambda_{\text{opt}}(V_{\text{B}}), V_{\text{B}}]$ змінює закон оптимального навантаження ВР моментом – ОТС (1.16), створюваний генератором, через відповідний вплив на величину

коефіцієнта регулювання $k_{\rm M}$, який з врахуванням умов роботи ВЕУ набуде вигляду

$$k_{\rm M}(V_{\rm B}, \vartheta) = 0.5 \,\rho_{\rm \Pi}(\vartheta) \,A \,C_{\rm P\,max}(V_{\rm B}) \left[\frac{r}{\lambda_{\rm opt}(V_{\rm B})}\right]^3.$$
(2.10)



Рис. 2.9. Залежність густини повітря ρ_{π} від температури повітря ϑ і висоти над рівнем моря *h*

Нехтування впливів швидкості вітру й температури повітря в залежності (2.10) призводитиме до відхилень від точок оптимальної з аеродинамічної точки зору роботи ВЕУ в усталених режимах (при постійних швидкостях вітру) й зменшення кількості отриманої від вітру енергії.

Комп'ютерну модель ВР, побудовану в середовищі МАТLAB/Simulink з врахуванням умов його роботи, зображено на рис. 2.10. Вона є перетворювачем енергії вітру в механічний момент, який прикладається до СГПМ. У підсистемі **Ср(lambda)** реалізована залежність $C_{\rm P}(\lambda, V_{\rm B})$ за виразом (2.8), на вхід якої подано значення швидкості вітру через коефіцієнт С(V), в якому реалізовано нелінійну функцію $f(V_{\rm B})$. Також у комп'ютерній моделі враховано вплив температури навколишнього середовища на густину повітря в блоці $\rho(t)$, де записана функція (2.9). Підсистема **WT Start Control** перемикає вихідний сигнал switch з логічного 0 на 1, коли швидкохідність ВР досягне оптимального значення. Цей сигнал відмикає значний стартовий момент (рис. 2.2), призначений для швидкого розгону ВР.



Рис. 2.10. Комп'ютерна модель підсистеми ВР (Wind Turbine Subsystem)

2.2.3. Підсистема СГПМ з векторним керуванням струмом якоря. Класична математична модель СГПМ (без врахування втрат у сталі та насичення магнітопроводу) в обертовій з ротором системі координат *d-q*, зорієнтованій віссю *d* вздовж вектора потоку постійних магнітів, описує така система рівнянь [61, 114]:

$$u_{\rm d} = Ri_{\rm d} + L_{\rm d} \frac{\rm d}{{\rm d}t} i_{\rm d} - \omega_{\rm e} L_{\rm q} i_{\rm q}$$
(2.11)

$$u_{\rm q} = Ri_{\rm q} + L_{\rm q} \frac{\rm d}{{\rm d}t}i_{\rm q} + \omega L_{\rm d}i_{\rm d} + \omega_{\rm e}\Phi_{\rm m}$$
(2.12)

$$M_{\rm em} = \frac{3}{2} p \Big[\Phi_{\rm m} i_{\rm q} + (L_{\rm d} - L_{\rm q}) i_{\rm d} i_{\rm q} \Big].$$
(2.13)

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\omega = \frac{1}{J_{\Sigma}} \left(M_{\mathrm{BP}} - M_{\mathrm{em}} - b\omega - M_{\mathrm{c}} \right), \qquad (2.14)$$

де и, і – миттєві значення напруг і струмів якоря;

R, L_d , L_q – відповідно активний опір й індуктивності обмотки якоря вздовж осей d і q;

Ф_т – амплітуда потокозчеплення обмотки якоря з парою полюсів постійних магнітів ротора;

 $\omega_{\rm e} = p\omega$ – колова частота ЕРС;

р – кількість пар полюсів;

Мем – електромагнітний момент;

 J_{Σ} – сумарний момент інерції ВЕУ (ВР та СГПМ);

b – коефіцієнт в'язкого тертя механічної частини ВЕУ;

 $M_{\rm c}$ – момент статичного навантаження на валу СГПМ.

Математична модель СГПМ не містить періодично змінних коефіцієнтів, проте є нелінійною через добуток змінних, що входять у рівняння.

У варіанті розміщення постійних магнітів генератора на поверхні його ротора, що й реалізовано в багатополюсних СГПМ, індуктивності обмотки якоря відносно осей d і q однакові $L = L_d = L_q$. У такому випадку мінімум втрат у міді обмотки якоря досягаємо при керуванні струмом якоря за умовою $i_d = 0$. При цьому струм якоря генератора формується синфазно до ЕРС його обертання, амплітуда якої рівна

$$E(\omega) = p \Phi_{\rm m} \omega . \qquad (2.15)$$

Величина амплітуди струму, необхідна для продукування електромагнітного моменту $M_{\rm em}(\omega)$, становить

$$I(\omega) = \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega M_{eM}(\omega)}{E(\omega)} = \frac{2}{3} \cdot \frac{M_{eM}(\omega)}{p \Phi_{m}} = k_{I} M_{eM}(\omega) , \qquad (2.16)$$

де $k_{\rm I} = 2/(3p \, \Phi_{\rm m})$ – коефіцієнт пропорційності між електромагнітним моментом й амплітудою струму якоря СГПМ при векторному керуванні.

Втрати потужності в багатополюсному СГПМ практично зведені до втрат в міді обмоток якоря, оскільки на малих швидкостях вітру, коли електричне

навантаження генератора невелике, частота напруги на виході генератора, а отже, й втрати в сталі теж невеликі. На високих швидкостях вітру та вищих частотах обертання, коли збільшуються втрати в сталі, потужність електричного навантаження зростає в кубі до кутової швидкості, а втрати в міді значно переважають. При роботі в зоні обмеження потужності ВЕУ за stall-регулювання електромагнітний момент теж видимо зростає, а кутова швидкість падає, тобто мають місце ще більші втрати в міді порівняно з втратами в сталі. У цьому режимі можна врахувати магнітне насичення СГПМ, наприклад, за методикою, сформованою в [9]. Лише в режимі обмеження потужності ВЕУ featheringрегулюванням ситуація змінюється на протилежну – момент падає, а кутова швидкість значно зростає, тому тут вже переважають втрати потужності в сталі СГПМ, які доцільно врахувати, наприклад, за методикою, застосованою в [9].

Втрати в міді обмотки якоря СГПМ від протікання струму рівні

$$\Delta P_{\rm r} = \frac{3}{2} i^2 R , \qquad (2.17)$$

де $i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ – амплітуда струму якоря.

У роботі застосовано віртуальну модель синхронної машини з постійними магнітами **Permanent Magnet Synchronous Machine** з бібліотеки SimPowerSystem пакету MATLAB/Simulink, яка побудована за математичною моделлю, описаною системою рівнянь (2.11) – (2.14). Система векторного керування струмом якоря відповідає функціональній схемі, показаній на рис. 2.1. Комп'ютерну модель підсистеми векторного керування СГПМ разом із системою оптимального керування роботою ВЕУ наведено на рис. 2.11.

Система векторного керування СГПМ побудована фактично на трьох підсистемах: зворотного перетворення Парка **dq**- $\alpha\beta_1$, зворотного перетворення Кларка $\alpha\beta$ -**abc_1** і гістерезисних регуляторів лінійних струмів якоря **Current Regulator**. Перша підсистема перетворює струми завдання $i_d = 0$ та i_q , що формує електромагнітний момент СГПМ, у відповідні двофазні координати нерухомої системи координат α - β . Для цього використовується інформація про кут

положення ротора в електричних градусах, що подається на вхід w*t цієї підсистеми. Друга підсистема перетворює струми завдання з системи α - β у трифазну систему координат *abc*. Регулятори фазних струмів порівнюють струми завдання, що поступають на вхід Іавс*, з відповідними виміряними значеннями лінійних струмів якоря Іавс. Подібно до струмів, за допомогою підсистем перетворення координат **dq**- $\alpha\beta_2$ і $\alpha\beta$ -**abc**₂ формуються фазні ЕРС генератора, які зіставляються з відповідними лінійними струмами в осцилоскопі **i**,е та поступають до підсистеми **Power Subsystem**. Остання в результаті скалярного добутку вказаних координат здійснює обчислення електромагнітної потужності та обчислення електромагнітної енергії генератора.



Рис. 2.11. Комп'ютерна модель підсистеми векторного керування СГПМ разом із системою оптимального керування роботою ВЕУ (**Control Subsystem**)

Задля симулювання роботи системи ВЕУ на тривалих відрізках часу, трифазний АВН, який реалізує мостова схема з 6-ма транзисторами та зворотними діодами, керований високочастотними сигналами, що поступають з гістерезисних регуляторів струму ГРС, замінено трьома віртуальними неперервними керованими джерелами напруг. Останні реалізовані в підсистемі **Voltage** **convertor** (рис. 2.2), ввімкнені у проти відповідних фазних ЕРС і віртуально відтворюють сформовані ГРС протинапруги, що забезпечують еквівалентне АВН навантаження СГПМ синусоїдальними струмами. Завдяки цьому час симулювання на сучасному комп'ютері приблизно рівний часу реального перебігу процесу.

2.2.4. Підсистема бездавачевої САР оптимального керування моментом (ОТС) навантаження ВР. Системи ОТС будують відповідно до виразу (1.16) з урахуванням моментів сухого M_c і в'язкого $b\omega$ тертя

$$M_{\rm em} = k_{\rm M}\omega^2 - M_{\rm c} - b\omega, \qquad (2.18)$$

Її реалізовано в правому верхньому куті комп'ютерної моделі, показаної на рис. 2.11. Отримане значення завдання на електромагнітний момент СГПМ перераховується відповідно до виразу (2.16) на завдання амплітуди струму якоря, яке поступає на вхід **іq** системи векторного керування.

2.3. Дослідження особливостей малопотужних ВЕУ з ВВО як динамічних керованих об'єктів

Суттєва нелінійність, перш за все, характеристик ВР зумовлює доцільність дослідження динамічних характеристик найбільш інерційної механічної частини ВЕУ, описаної рівнянням (2.14).

На рис. 2.12 стрілками показано, як здійснюється перехід з точки 1 усталеної роботи ВР при швидкості вітру V_{B1} до точки 2, коли швидкість вітру зростає до V_{B2} за системи керування ОТС. У безконечно малому наближенні точка 2 збігається з точкою 1, а характеристики $M_{BP}(\omega)$ і $M_{opt}(\omega)$ можна лінеаризувати дотичними у цій точці, як показано на рис. 2.12. Коефіцієнти жорсткості цих дотичних описуємо такими виразами:



Рис. 2.12. До математичного опису перехідної функції кутової швидкості ВР

Підставляючи отримані з рівнянь (2.19) $M_{\rm BP}$ та $M_{\rm em}$ в (2.14), після перетворень отримуємо класичне лінійне диференціальне рівняння першого порядку

$$T_{\rm am} \frac{\mathrm{d}\,\omega}{\mathrm{d}\,t} + \omega = \omega_{\rm c} \,\,, \tag{2.20}$$

де

$$\omega_{\rm c} = \frac{\beta_{\Gamma}\omega_{0,\Gamma} - \beta_{\rm BP}\omega_{0,\rm BP} - M_{\rm c}}{\beta_{\Gamma} - \beta_{\rm BP} + b} , \qquad (2.21)$$

$$T_{\rm am} = \frac{J_{\Sigma}}{\beta_{\Gamma} - \beta_{\rm BP} + b} . \tag{2.22}$$

Отримані вирази представляють: (2.21) – кінцеве значення кутової швидкості в точці 2, (2.22) – аеромеханічну сталу часу системи ВР–СГПМ. Для отримання виразу аеромеханічної сталої часу необхідно визначити жорсткості

$$\beta_{\rm BP} = \frac{\mathrm{d}M_{\rm BP}}{\mathrm{d}\omega}, \qquad \beta_{\Gamma} = \frac{\mathrm{d}M_{\rm em}}{\mathrm{d}\omega}.$$
 (2.23)

Підставляючи в перше з рівнянь (2.23) вираз (1.12) з врахуванням умови роботи в ТМВП (1.15), а в друге – вираз (2.18), після диференціювання отримуємо

$$\beta_{\rm BP} = -\frac{1}{2} \rho_{\rm \pi} A C_{\rm P \,max} \left(\frac{r}{\lambda_{\rm opt}}\right)^2 V_{\rm B} , \quad \beta_{\rm \Gamma} = \rho_{\rm \pi} A C_{\rm P \,max} \left(\frac{r}{\lambda_{\rm opt}}\right)^2 V_{\rm B} . \tag{2.24}$$

Підставляючи отримані вирази (2.24) в рівняння (2.22) за умови нехтування в'язким тертям отримуємо наступний вираз для аеромеханічної сталої часу ВЕУ, керованої за принципом ОТС:

$$T_{\rm am} = k_{\rm BP} \frac{J_{\Sigma}}{AV_{\rm B} r^2}, \qquad (2.25)$$

де $k_{\rm BP} = \lambda_{\rm opt}^2 / (1.5 \rho_{\rm n} C_{\rm P \, max})$ – сталий для BP із заданою аеродинамічною характеристикою $C_{\rm P}(\lambda)$ коефіцієнт.

Як видно з отриманої залежності (2.25), аеромеханічна стала конкретного ВР, окрім його моменту інерції та геометричних розмірів – площі омивання *A* та радіуса *r*, також обернено пропорційно залежить від швидкості вітру.

Щоб дослідити отриманий вираз для аеромеханічної сталої часу ВЕУ (2.25), а також динаміку роботи ВЕУ, було взято п'ять ВЕУ з ВВО різної потужності 0,5, 1, 2, 5 і 10 кВт, розраховані на номінальну швидкість вітру $V_{\text{в.н}} = 10$ м/с (табл. 2.2). Усі вони мали однакову аеродинамічну характеристику $C_{\text{P}}(\lambda)$, показану на рис. 1.7. Параметри ВР для цих ВЕУ розраховували за виразами:

$$P_{\rm Mex} = \frac{P_{\rm eff}}{\eta_{\Sigma}}; \quad A = \frac{P_{\rm Mex}}{0.5\rho_{\rm II}C_{\rm Pmax}V_{\rm B.H}^3}; \quad r = \sqrt{\frac{A}{2}}; \quad \omega_{\rm H} = \frac{\lambda_{\rm opt}V_{\rm B.H}}{r}; \quad M_{\rm H} = \frac{P_{\rm Mex,H}}{\omega_{\rm H}},$$

де $\eta_{\Sigma} = 0,85$ – сумарний ККД генератора та механічної трансмісії.

Значення сумарного моменту інерції ВР з ротором СГПМ J_{Σ} взято орієнтовно з довідкової літератури.
Обчислені відповідно до виразу (2.25) залежності аеромеханічної сталої часу ВР для дослідних ВЕУ при різних швидкостях вітру наведені на рис. 2.13. На останньому видно, що аеромеханічна стала часу ВЕУ значно зростає зі зменшенням потужності ВЕУ та швидкості вітру, тобто потужності, відібраної від вітру. Такий нелінійний характер динамічних властивостей ВЕУ, безумовно, відіб'ється на роботі ВЕУ та її енергетичній ефективності.

2.4. Дослідження роботи автономних ВЕУ з ВВО різної потужності на турбулентних вітрах комп'ютерним симулюванням

Для дослідження динаміки роботи ВЕУ різних потужностей на турбулентних вітрах комп'ютерним симулюванням, нами вибрані реальні параметри СГПМ. При виборі кількості пар полюсів генераторів враховано умову, за якої при їх номінальній кутовій швидкості частота ЕРС становила f = 50 Гц. Тоді $p = 2\pi f / \omega_{\rm H}$. Решта параметрів СГПМ підібрані спеціально створеною комп'ютерною програмою так, щоб у номінальному режимі роботи ККД генератора становив 0,9, а соs φ приблизно 0,8. Результати цієї роботи занесено в табл. 2.3. Там же приведено обчислені на підставі даних табл. 2.2 значення коефіцієнтів $k_{\rm M}$ (1.17) і $k_{\rm I}$ (2.16), необхідних для побудови САК роботою ВЕУ за принципом ОТС.

Робота кожної з приведених у табл. 2.2 і 2.3 ВЕУ була досліджена на розробленій у цьому розділі комп'ютерній моделі протягом 300 с при трьох різних турбулентних вітрах із середніми швидкостями 3, 4, 5 м/с. Для оцінки зниження ефективності відбору потужності від вітру паралельно з моделлю реальної ВЕУ була запущена ідеалізована модель ВЕУ з аналогічними параметрами, з дуже малим моментом інерції – 0,5 кг·м². Це давало можливість автоматично регулювати оптимальне навантаження ідеалізованої ВЕУ практично безінерційно при турбулентних вітрах, що забезпечувало її постійну роботу в ЕВМП.

Таблиця 2.2

ВЕУ	BP					
$P_{e \pi. \mathrm{H}}$,	$P_{\text{Mex.H}}$,	А,	r,	ω _н ,	М _н ,	J_{Σ} ,
кВт	кВт	M^2	Μ	рад/с	Н∙м	$\mathbf{K}\mathbf{\Gamma}\cdot\mathbf{M}^2$
0,5	0,588	2,724	1,41	26,0	22,6	14
1,0	1,176	5,448	1,65	22,2	53,0	31
2,0	2,353	10,90	2,33	15,7	149,4	90
5,0	5,882	27,25	3,69	9,95	591,2	310
10,0	11,76	54,48	5,22	7,03	1673	850

Параметри ВР для дослідних ВЕУ з ВВО



Рис. 2.13. Залежність аеромеханічної сталої часу ВР, що працює в точці максимальної потужності, від потужності ВЕУ при різних швидкостях вітру

Таблиця 2.3

ВЕУ	СГПМ				САК		
<i>Р</i> _{ел.н} ,	n	ψ _m ,	<i>R</i> ,	<i>L</i> ,	k.	k.	
кВт	P	Вб	Ом	Гн	۳M	κĮ	
0,5	12	0,10	0,30	0,005	0,0332	0,5556	
1,0	14	0,13	0,25	0,003	0,1064	0,3663	
2,0	20	0,16	0,20	0,0025	0,5996	0,2083	
5,0	32	0,22	0,15	0,002	5,955	0,0947	
10,0	45	0,28	0,12	0,0015	33,70	0,0529	

Параметри дослідних ВЕУ з ВВО

Таким чином паралельно ми отримували по два значення механічної енергії на валу ВР: для дослідної $W_{\rm BP}$ й аналогічної ідеалізованої ВЕУ $W_{\rm BPMAX}$ (табл. 2.4). Ефективність відбору потужності вітру оцінювали коефіцієнтом відбору

$$k_{\rm B} = \frac{W_{\rm BP}}{W_{\rm BP\,max}},\tag{2.26}$$

значення якого для досліджуваних ВЕУ, що працювали на різних вітрах, приведено рис. 2.14, з якого видно, як при збільшенні потужності ВЕУ й відповідно розмірів ВР, а також середньої швидкості вітру, ефективність відбору ВР потужності від вітру зростає.

Таблиця 2.4

<i>Р</i> _{ел.н} ,	W _{ВР} , кДж / W _{ВР max} , кДж				
кВт	$V_{\rm в.cep} = 3$ м/с	$V_{\rm B.cep} = 4 \mathrm{M/c}$	$V_{\text{B.cep}} = 5 \text{ M/c}$		
0,5	0,965 / 1,079	6,348 / 6,575	15,88 / 16,16		
1,0	7,522 / 7,725	20,62 / 21,06	42,23 / 42,77		
2,0	20,41 / 20,72	48,81 / 49,56	94,37 / 95,36		
5,0	56,05 / 56,65	129,3 / 130,7	245,3 / 247,2		
10,0	114,3 / 115,3	261,7 / 263,9	467,7 / 473,5		

Отримані значення $W_{\rm BP}$ та $W_{\rm BP\,max}$ для дослідних ВЕУ

На рис. 2.15 і 2.16 приведено отримані на моделі осцилограми основних координат ВР при роботі ВЕУ з параметрами, що відповідають двом крайнім випадкам табл. 2.4: номінальною потужністю відповідно 0,5 кВт на турбулентному вітрі зі середньою швидкістю 3 м/с і 10 кВт – на вітрі 5 м/с.

Як видно з осцилограм (рис. 2.15, а, б), малопотужна ВЕУ на малому вітрі, коли механічна стала часу є найбільшою й становить 18 с (рис. 2.13), має низьку динаміку: кутова швидкість і механічна потужність реального ВР значно відстають від цих же координат для ідеального ВР. Це призводить до відповідних

відхилень коефіцієнта потужності від свого максимального значення $C_{P max} = 0,351$. Потужнішу ВЕУ (10 кВт) на вітрі з вищою середньою швидкістю (5 м/с), коли механічна стала зменшується до значення 2,5 с (рис. 2.13), вже характеризує значно краща динаміка, яка наближається до ідеального ВР (рис. 2.16, а, б). Це забезпечує практично максимальне значення коефіцієнта потужності ВР.



Рис. 2.14. Залежність коефіцієнта ефективності відбору k_в енергії вітру ВЕУ від її потужності та середньої швидкості турбулентного вітру (3, 4, 5 м/с)

Для подальших досліджень, задля створення ефективної САК роботою автономної ВЕУ з ВВО, розроблена тестова модель турбулентного вітру з плавно змінною середньою швидкістю. Номінальна потужність тестової ВЕУ становила 1,0 кВт, параметри ВЕУ наведені в табл. 2.2 і 2.3, але вже із залежною від швидкості вітру аеродинамічною характеристикою, показаною на рис. 2.8. У моделі також враховано залежність роботи ВР від температури повітря.



Рис. 2.15. Осцилограми роботи ВЕУ потужністю 0,5 кВт на турбулентному вітрі зі середньою швидкістю 3 м/с: а) кутова швидкість ідеального 1 і реального 2 ВР, б) потужність ідеального 1 і реального 2 ВР, в) коефіцієнт потужності ВР



Рис. 2.16. Осцилограми роботи ВЕУ потужністю 10 кВт на турбулентному вітрі зі середньою швидкістю 5 м/с: а) кутова швидкість ідеального 1 і реального 2 ВР, б) потужність ідеального 1 і реального 2 ВР, в) коефіцієнт потужності ВР

2.5. Висновки до розділу

1. Для базової структури безредукторної ВЕУ з високошвидкісним Нротором і СГПМ, електричне навантаження якого регулює АВН з векторним керуванням струмом якоря генератора, розроблено в середовищі MATLAB/Simulink загальну комп'ютерну модель, яка дає змогу проводити симулювання роботи ВЕУ на тривалих проміжках часу.

2. Розроблено математичну модель вітрового потоку, яка дає можливість моделювати різні ступені турбулентності для різних середніх швидкостей вітру. Створено низку комп'ютерних моделей вітрів з різними значеннями середніх швидкостей і ступенями турбулентності.

3. Створено математичну модель ВР, в якій враховано вплив швидкості вітру та температури повітря на його робочі характеристики.

4. Теоретичні дослідження перехідного процесу у ВЕУ з оптимальним керуванням моментом дали змогу отримати новий математичний вираз для механічної сталої часу системи ВР–генератор. Його аналіз показує, що механічна стала часу є обернено пропорційна до швидкості вітру та зменшується зі збільшенням потужності ВЕУ. Проведені стимуляційні комп'ютерні дослідження підтвердили ці результати.

5. Для подальших досліджень сформовано тестовий профіль турбулентного вітру зі змінною середньою швидкістю та вибрано тестову ВЕУ з ВВО номінальною потужністю 1 кВт, у якій враховано впливи швидкості вітру на аеродинамічні характеристику ВР і температури повітря на енергетичні характеристики ВЕУ.

РОЗДІЛ З

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПІДСИСТЕМОЮ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В АВТОНОМНІЙ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВІЙ ВЕУ

Розділ присвячено підвищенню енергетичної ефективності роботи автономної ВЕУ в усталених і перехідних режимах генерування електричної енергії. В усталених режимах це досягаємо застосуванням нечіткого коректора, який уточнює оптимальні робочі точки неповного навантаження СГПМ з врахуванням залежності аеродинамічної характеристики ВР від швидкості вітру та енергетичних характеристик ВЕУ від температури повітря. Для прискорення динамічних характеристик ВЕУ до традиційного керування за оптимальним моментом ОТС додано також автоматичне регулювання за відхиленням кутової швидкості від оптимальної. Досліджено та запропоновано структури регуляторів для обмеження максимальної потужності ВЕУ при роботі на великих вітрах. Ефективність запропонованих рішень підтверджує комп'ютерне симулювання роботи ВЕУ на турбулентних вітрах.

Основні результати розділу опубліковано в роботах автора [21, 36].

3.1. Визначення оптимальних з електроенергетичної точки зору робочих координат неповного навантаження **BE**У

Робота ВЕУ в усталеному режимі в точках максимуму характеристики $C_{\rm P}(\lambda, V_{\rm B})$ (рис. 2.8) забезпечує максимальний відбір потужності ВР від вітру, проте це не означає, що електрична потужність на виході буде максимальною. Це пов'язано з тим, що потік потужності від вітропотоку проходить через ланцюг перетворень, який складається, як мінімум, з ВР і генератора. Оскільки метою роботи ВЕУ є максимум отриманої електроенергії, то критерієм ефективності відбору потужності від вітру є мінімум сумарних втрат потужності у ВР і СГПМ.

Аналіз показує, що цьому мінімуму відповідає робоча точка на кривій $C_{\rm P}(\lambda, V_{\rm B})$, дещо зміщена від точки $C_{\rm Pmax}[\lambda_{\rm opt}(V_{\rm B}), V_{\rm B}]$. При цьому дещо знижується ефективність відбору ВР потужності від вітру (зростають аеродинамічні втрати потужності), проте зростає ККД генератора (знижуються втрати потужності в ньому). Сумарні ж втрати потужності в системі ВР–СГПМ стають мінімальними, що забезпечує максимальну потужність електроенергії на виході ВЕУ. Для ВЕУ з конкретними параметрами ВР і СГПМ для заданих умов праці ($V_{\rm B}$, ϑ) такій точці оптимальної роботи відповідатиме оптимальне з електроенергетичної точки зору значення кутової швидкості ВР з генератором $\omega_{\rm opt.e}$. Для отримання масиву таких точок, як функції умов праці ВЕУ, необхідно побудувати математичну модель, що відображає перетворення потужності в системі, причому всі змінні повинні бути функціями кутової швидкості ω .

Електрична потужність на виході генератора становить

$$P_{\rm en}(\omega) = P_{\rm em}(\omega) - \Delta P_{\rm r}(\omega) , \qquad (3.1)$$

де $P_{eM}(\omega)$ – електромагнітна потужність генератора; $\Delta P_{r}(\omega)$ – втрати потужності в генераторі.

Електромагнітну потужність генератора можна виразити через його електромагнітний момент $M_{\rm em}(\omega)$

$$P_{\rm em}(\omega) = M_{\rm em}(\omega) \cdot \omega , \qquad (3.2)$$

а значення останнього в усталеному режимі (за постійної кутової швидкості) виражаємо з рівняння балансу моментів на валу, що зв'язує ВР з генератором (2.14):

$$M_{\rm em}(\omega) = M_{\rm BP}(\omega) - M_{\rm c} - b\omega . \qquad (3.3)$$

Момент ВР як функцію його кутової швидкості та умов праці отримуємо на основі (1.12) з врахуванням (2.8):

$$M_{\rm BP}(\omega) = 0.5 \,\rho_{\rm II}(\vartheta) A \, r \, \frac{C_{\rm P}(\lambda, V_{\rm B})}{\lambda} V_{\rm B}^2.$$
(3.4)

82

Підставивши в (3.1) вирази (3.2)-(3.4) та вирази (2.15)-(2.17), отримаємо залежність електричної потужності на виході СГПМ від його кутової швидкості $P_{en}(\omega)$ за конкретних умов праці ВЕУ – швидкості вітру V_{B} та температури повітря 9. Дослідження цієї функції на максимум дає змогу визначати оптимальні з електроенергетичної точки зору точки роботи ВЕУ – $\omega_{opt.e}$. Для вирішення таких задач чисельним способом розроблено програму в середовищі Mathcad.

Використовуючи вищенаведені параметри тестової ВЕУ номінальною потужністю 1 кВт, за розробленою програмою проведено серії розрахунків $\omega_{opt.e}$ при роботі ВЕУ на різних швидкостях вітру та при різних температурах повітря (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Залежність оптимальної з електроенергетичної точки зору кутової швидкості ВР $\omega_{opt.e}$ від швидкості вітру і $V_{\rm B}$ температури повітря ϑ

Як видно з результатів, для конкретної швидкості вітру отримані оптимальні з електроенергетичної точки зору значення $\omega_{opt.e}$, а отже, й значення $\lambda_{opt.e}(V_B) = \omega_{opt.e} r/V_B$ та $C_{Popt.e}(V_B)$ відповідно до виразу (2.8), практично не залежать від температури, тому в подальшому враховуватимемо лише їхні залежності від V_в. На рис. 3.2 показано, як розміщені точки оптимальної роботи ВЕУ з електроенергетичної точки зору порівняно з аеродинамічними.



Рис. 3.2. Положення оптимальних робочих точок ВЕУ на кривих $C_{\rm P}(\lambda, V_{\rm B})$: 1 – оптимальні з аеродинамічної точки зору, 2 – оптимальні з електроенергетичної точки зору

Відповідно до нових точок оптимальної роботи ВЕУ $C_{Popt.e}[\lambda_{opt.e}(V_B), V_B]$, а також до значень температури повітря, будуть змінюватися й нові значення коефіцієнта $k_{M.e}(V_B, \vartheta)$, котрий обчислюється відповідно до виразу (2.10) та визначає оптимальний з точки зору отримуваної на виході ВЕУ електричної потужності момент навантаження на валу ВР:

$$M_{\rm BP.e.opt}(\omega) = k_{\rm M.e}(V_{\rm B}, \vartheta)\omega^2 . \qquad (3.5)$$

 $k_{\rm M.e}(V_{\rm B}, 9)$ доцільно представити у вигляді добутку базового значення сталого коефіцієнта $k_{\rm M} = 0,06282 \,\mathrm{H\cdot M\cdot c^2}$, визначеного за виразом $k_{\rm M} = 0,5 \,\rho \, A \, C_{\rm P\,max} \left(r/\lambda_{\rm opt} \right)^3$ з рівняння (1.16) для незалежної від умов роботи ВР характеристики $C_{\rm P}(\lambda)$, показаної на рис. 1.7, і коефіцієнта корекції вказаного базового значення $k_{\rm M}$:

$$k_{\kappa}(V_{\rm B},\vartheta) = \frac{k_{\rm M.e}(V_{\rm B},\vartheta)}{k_{\rm M}} .$$
(3.6)

Залежність $P_{en.max}(V_B, \mathcal{G})$, отримана на основі розробленої математичної моделі, наведена на рис. 3.3. За такого оптимального навантаження ВЕУ генеруватиме при різних значеннях швидкості вітру й температури повітря максимальну вихідну електричну потужність.

3.2. Розроблення комбінованого регулятора з нечітким коректором (НК) для підвищення енергетичної ефективності оптимального керування роботою ВЕУ

3.2.1. Розроблення НК для підвищення енергетичної ефективності роботи ВЕУ в усталених режимах. Для отримання значень коефіцієнта коректуючого зворотного зв'язку за збуреннями швидкості вітру $k_{\text{M.e}}(V_{\text{B}}, \mathcal{G})$ у режимі реального часу, значення якого змінюватимуться зі зміною швидкості вітру й температури, доцільно застосувати нечіткий коректор. Нечітку логіку щораз більше застосовують у сучасних системах керування, зокрема й ВЕУ [13, 134, 161, 174].



Рис. 3.3. Залежність вихідної електричної потужності ВЕУ від швидкості вітру й температури повітря

На рис. 3.4 зображено вибрані функції належності першого входу (а) НК, на який поступає сигнал швидкості вітру, та другого входу (б), яким є температура навколишнього середовища. Приведені функції належності охоплюють реальні діапазони зміни вказаних збурюючих факторів. Функції належності швидкості вітру розташовані густіше в ділянці низьких швидкостей вітру, де найбільше проявляється ефект від корекції коефіцієнта $k_{\rm M}$.



Рис. 3.4. Функції належності входів НК: а) перший вхід – швидкість вітру, б) другий вхід – температура повітря

Спираючись на розрахованих значеннях коефіцієнта $k_{M.e}(V_B, \mathcal{G})$, який визначає оптимальний момент навантаження на валу ВР (3.5), в табл. 3.1, відповідно до виразу (3.6), записано базу правил для НК, на виході якого отримуємо значення коректуючого коефіцієнта $k_{\kappa}(V_B, \mathcal{G})$. Враховуючи, що значення $k_{\kappa}(V_B, \mathcal{G})$ є відомими в точках, показаних у табл. 3.1, доцільно застосувати нечітку базу знань Сугено [127]. Оскільки вихідний сигнал такої бази знань має діапазон значень від 0 до 1, необхідно пронормувати сформовану базу правил за виразом

$$x^{*} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$
 (3.7)

де *x*, *x*_{min}, *x*_{max} – відповідно поточне, мінімальне та максимальне значення вихідної координати бази правил;

*х** – відповідне нормоване значення поточної координати.

Таблиця 3.1

$V_{\rm в}$, м/с	<i>9</i> , °С	-25	-15	-5	5	15	25	35
3		1,505	1,468	1,440	1,409	1,386	1,359	1,340
4		1,260	1,228	1,199	1,169	1,145	1,122	1,098
6	k_{κ}	1,109	1,078	1,050	1,024	0,999	0,975	0,953
8		1,038	1,012	0,987	0,963	0,940	0,919	0,900
10		0,972	0,947	0,926	0,908	0,895	0,874	0,856

База правил нечіткого коректора

Сформовану поверхню «входи – вихід» НК показано на рис. 3.5.



Рис. 3.5. Залежність виходу НК від його двох входів

При традиційному класичному оптимальному керуванні за моментом ОТС значення коефіцієнта $k_{\rm M} = 0,06282$ H·м·c² є не змінним і для тестової ВЕУ відповідає характеристиці $C_{\rm P}(\lambda)$, описаної виразом (2.11), при середній швидкості вітру $V_{\rm B} = 6$ м/с і середньому значенню температури $\vartheta = 13^{\circ}$ С. Залежність електричної потужності на виході тестової ВЕУ, керованої за принципом ОТС, $P_{\rm en.OTC}(V_{\rm B}, \vartheta)$, необхідно отримати з урахуванням того, що параметри та характеристики реального ВР залежать від умов його роботи ($V_{\rm B}, \vartheta$), а значення коефіцієнта $k_{\rm M}$ не змінне. При такому керуванні на реальних залежних від швидкості вітру характеристиках ВР (2.8), а також залежній від температури густині повітря (2.9), ВЕУ прямуватиме до роботи в нових точках усталеного режиму. Їх можна знайти, прирівнявши реальний момент, що розвиває ВР, до моменту його навантаження, що визначається за ОТС і формується генератором:

$$0.5 \rho(\vartheta) A r \frac{C_{\rm P} [\lambda(\omega, V_{\rm B}), V_{\rm B}]}{\lambda(\omega, V_{\rm B})} V_{\rm B}^{2} = k_{\rm M} \omega^{2} . \qquad (3.8)$$

Розв'язки нелінійного рівняння (3.8) для конкретних умов роботи ВЕУ дають значення робочих кутових швидкостей ВР при класичному керуванні за ОТС $\omega_{OTC}(V_B, \mathcal{G})$. Як показали дослідження, ці точки, на відміну від аналогічного керування, але спрямованого на отримання максимальної вихідної електричної потужності із застосуванням НК (рис. 3.1), і від температури, що видно з рис. 3.6.

Виходячи з отриманих значень $\omega_{OTC}(V_B, \mathcal{G})$, знайдено відповідні значення робочих точок на кривих $C_P(\lambda, V_B)$ (рис. 3.7), які відрізняються від аналогічних для уточненого НК оптимального з електроенергетичної точки зору керування (рис. 3.2).

За отриманими значеннями робочих точок тестової ВЕУ, керованої за класичним принципом ОТС, обчислено відповідні значення вихідної електричної потужності при різних значеннях швидкості вітру й температури повітря $P_{\rm en.OTC}(V_{\rm B}, \mathcal{G})$. Зіставивши їх з відповідними значеннями вихідної електричної потужності цієї ВЕУ, керованої за принципом ОТС, оптимальним з

електроенергетичної точки зору із застосуванням НК, отримано значення коефіцієнта відносної енергетичної ефективності (рис. 3.8):

$$k_{e\phi,B}(V_{B}, \mathcal{G}) = \frac{P_{e\pi,HK}(V_{B}, \mathcal{G})}{P_{e\pi,OTC}(V_{B}, \mathcal{G})} .$$
(3.9)



Рис. 3.6. Залежність робочої кутової швидкості ВР ω_{OTC} від швидкості вітру й температури повітря (керування за класичним принципом OTC)



Рис. 3.7. Положення робочих точок ВР для керування за принципом ОТС за різних значень швидкості вітру й температури повітря



Рис. 3.8. Залежність коефіцієнта відносної енергетичної ефективності роботи тестової ВЕУ від швидкості вітру й температури повітря

Як видно з рис. 3.8, енергетична ефективність розробленого принципу керування із застосування НК найбільше проявляється при роботі на малих швидкостях вітру та зростає зі зниженням температури повітря.

3.2.1. Розроблення комбінованого регулятора для прискорення перехідних процесів роботи ВЕУ на турбулентних вітрах. Оскільки в системі повинен бути давач швидкості вітру, варто розвинути структуру САК, додавши до регулювання за збуренням швидкості вітру ще й регулювання за її відхиленням, яке має форсуючу дію. Це особливо доцільно при роботі на вітрах з низькою швидкістю, коли механічна стала часу ВР значно зростає (рис. 2.13). На рис. 3.9 представлено структуру комбінованого регулятора: за збуренням від швидкості вітру з корекцією на цю швидкість і температуру повітря та за відхиленням від оптимальної кутової швидкості.

Регулювання за збуренням здійснюється за принципом ОТС, спрямованим на максимум вихідної електричної потужності з корекцією точок оптимальної роботи за допомогою розробленого НК. Вихідний сигнал останнього у вигляді відносних значень коректуючого коефіцієнта k_{κ} денормується за виразом

 $x = x_{\min} + x^* (x_{\max} - x_{\min})$, отриманим з (3.7). Абсолютне значення визначеного коефіцієнта k_{κ} після множення на базове значення коефіцієнта $k_{M} = 0,06282 \text{ H} \cdot \text{m} \cdot \text{c}^{2}$ і ω^{2} дає значення завдання на оптимальний момент навантаження ВР $M_{\text{BP.opt.e}}^{*}$. Завдання на оптимальний електромагнітний момент СГПМ $M_{\text{ем.opt.e}}^{*}$ обчислюється з $M_{\text{BP.opt.e}}^{*}$ відповідно до рівняння (3.3).



Рис. 3.9. Структурна схема комбінованого регулятора роботи ВЕУ

Регулювання за відхиленням здійснюється з допомогою регулятора швидкості РШ, на вході якого порівнюються сигнали завдання оптимальної кутової швидкості $\omega_{opt.e}$ і від'ємного зворотного зв'язку за вимірюваною кутовою швидкістю генератора з ВР ω . Сигнал завдання оптимальної з електроенергетичної точки зору кутової швидкості отримується з виміряної швидкості вітру за виразом $\omega_{opt.e} = V_{\rm B} \lambda_{opt.e} (V_{\rm B})/r$.

Для забезпечення потрібної швидкодії автоматичного керування роботою ВЕУ достатньо використати РШ пропорційного типу. В ідеальному випадку керування за збуренням завжди забезпечуватиме регулювання в точках усталеного режиму роботи ВЕУ до оптимальних значень кутової швидкості $\omega_{opt.e}$, що виключатиме похибку на вході РШ. Проте при застосуванні дешевого анемометра точність вимірювання швидкості вітру буде невисокою, що цілком припустимо для роботи НК, але вноситиме додаткові похибки в точність

обчислення точок усталеного режиму. Застосування пропорційно-інтегруючого РШ теж не вирішить питання через похибку завдання оптимальної кутової швидкості, яка визначається через швидкість вітру. Кращим варіантом є застосування замість РШ диференціатора кутової швидкості з відповідним коефіцієнтом підсилення. Таке рішення не вноситиме жодних похибок в усталені режими, а гладкий сигнал кутової швидкості без проблем піддається диференціюванню, особливо в цифровому варіанті реалізації.

Шляхом вибору значення коефіцієнта підсилення РШ чи диференціатора можна забезпечити потрібне форсування перехідних процесів. Як показали дослідження [4], існує так звана оптимальна швидкодія роботи ВЕУ, при якій сума аеродинамічних втрат потужності ВР й електричних втрат потужності в обмотках СГПМ мінімальна. Значення коефіцієнта підсилення, який забезпечить таку оптимальну швидкодію, можна отримати лише імітаційним комп'ютерним моделюванням.

На рис. 3.10, а представлено комп'ютерну модель підсистеми оптимального керування навантаженням СГПМ, розроблену на підставі структурної схеми, показаної на рис. 3.9, але із застосуванням диференціатора кутової швидкості diff з відповідним коефіцієнтом підсилення k_P. НК реалізовано блоком Fuzzy Logic Controller. Вихідний сигнал НК денормується, відповідно до виразу (3.7), до абсолютних величин і поступає на блок k_M з коефіцієнтом підсилення $k_{\rm M}$. Пропорційний коефіцієнт k_P, який забезпечує оптимальну швидкодію системи в перехідних режимах і становить 1,95, було отримано експериментально комп'ютерним моделюванням. Канал форсування перехідних процесів в імітаційних дослідженнях вмикається блоком Switch з моменту часу 20 с після розгону ВР до усталеної кутової швидкості. Дискретне диференціювання виконує блок Transport Delay (рис. 3.10, б) із заданою дискретністю Tz. Вихідним сигналом підсистеми є завдання на поперечну складову струму якоря СГПМ І*q з відповідними обмеженнями.



Рис. 3.10. Комп'ютерна модель підсистеми оптимального керування навантаженням СГПМ в САК роботою ВЕУ (а) та модель підсистеми diff (б)

3.3. Дослідження структур і створення систем обмеження потужності ВЕУ при роботі на великих вітрах

3.3.1. Розроблення САК для stall-регулювання. Перехід ВЕУ в режим роботи stall-регулювання здійснюється, збільшуючи момент навантаження ВР за допомогою СГПМ. При цьому, як видно з рис. 1.14, б, кутова швидкість ВР зменшуватиметься, а його механічний момент на швидкостях вітру, які незначно перевищують номінальне для ВЕУ значення, теж зростатиме. При подальшому збільшенні швидкості вітру момент ВР досягне максимального значення та почне зменшуватися, оскільки робоча точка ВР переміститься на спадаючу ділянку характеристики $M_{\rm BP}(\omega)$. Простий аналіз показує, що для заданого генератором моменту навантаження ця ділянка характеристики не забезпечує статичної

стійкості роботи ВЕУ. Стійкість можна забезпечити лише автоматичним регулюванням у замкненій САР. З показаних на рис. 1.14, б залежностей видно, що об'єкт регулювання ще й явно не лінійний.

Як показали дослідження, проведені комп'ютерним симулюванням, для стабілізації робочої точки ВР на заданій характеристиці стабілізації потужності Р_{ВР.н} (рис. 1.14, а), останню в такій статично нестійкій та нелінійній САР не вдається автоматично регулювати з потрібною швидкодією за електричною потужністю, вимірюваною на виході СГПМ. Тут необхідне автоматичне регулювання безпосередньо за механічною потужністю ВР. Оскільки виміряти останню немає можливості, її значення потрібно обчислювати, причому значення має не точність обчислення, а швидкодія отримання хоча б наближеного значення *P*_{вр.} Для досліджуваної ВЕУ це досить просто здійснити за виміряними значеннями швидкості вітру V_в і кутової швидкості генератора ω за виразами (1.11), (1.8) та (1.14). На структурній схемі розробленої САР для stall-регулювання (рис. 3.11) це здійснює естиматор потужності ЕП. Отримане на його виході поточне значення потужності ВР $\hat{P}_{\rm BP}$ порівнюється з номінальним значенням Р_{ВР.н.} Їхня різниця поступає на ПІ-регулятор потужності РП, який формує завдання на додатковий момент $M^*_{\rm P.non}$. Він додається до завдання на електромагнітний момент СГПМ $M^*_{\text{ем.opt.e}}$, який формує система регулювання за неповного навантаження ВЕУ (рис. 3.9).

Принцип роботи системи обмеження потужності є таким. У режимі неповного навантаження ВЕУ $P_{\rm BP} < P_{\rm BP, H}$, тому на виході РП буде від'ємний сигнал, який обмежено на рівні 0 (система обмеження не працює). При збільшенні швидкості вітру понад номінальне значення настає умова $P_{\rm BP} > P_{\rm BP, H}$, що призводить до появи на виході РП завдання на додатковий момент $M_{\rm P,dod}^*$, який збільшуватиме електромагнітний момент СГПМ доти, доки потужність ВР не зменшиться до номінального рівня.



Рис. 3.11. Структурна схема САР, що забезпечує stall-регулювання роботи ВЕУ на великих вітрах



Рис. 3.12. Комп'ютерна модель підсистеми керування роботою ВЕУ: оптимального керування за неповного навантаження та обмеження механічної потужності BP stall-регулюванням на великих вітрах

На рис. 3.12 приведено комп'ютерну модель підсистеми САК ВЕУ, у якій розроблена в підрозділі 3.2 система оптимального керування роботою ВЕУ при її неповному навантаженні доповнена системою стабілізації механічної потужності ВР stall-регулюванням при обмеженні потужності ВЕУ. На вхід Ртесh подається обчислене естиматором значення механічної потужності ВР. Обмежується механічна потужність на рівні 1300 Вт. Параметри ПІ-регулятора потужності РП (PR_PI) визначені в ході комп'ютерного симулювання: $k_p = 0,15$, $k_i = 0,10$.

На рис. 3.13 приведено осцилограми комп'ютерного симулювання, які ілюструють роботу системи обмеження потужності ВЕ stall-регулюванням. Тестова швидкість вітру сформована так (рис. 3.13, а): до 10 с V_в = 9 м/с, що нижче за номінальну, рівну 10 м/с; у час 10 с швидкість вітру стрімко зростає до 13 м/с; при t = 40 с вона стрімко падає до 11 м/с, а при t = 70 с – повертається до 9 м/с. Отже, можна продемонструвати вхід ВЕУ в режим обмеження потужності та її вихід з цього режиму. Сигнал на вході РП (рис. 3.13, б) в усталених режимах обмеження потужності встановлюється на рівні 0 завдяки інтегральній складовій регулятора. Формування сигналу $M^*_{\rm P,god}$ показано на рис. 3.13, в. У результаті на високих швидкостях вітру зростає електромагнітний момент СГПМ (рис. 3.13, г) і падає кутова швидкість ВР (рис. 3.13, д). Це призводить до стабілізації механічної потужності ВР на заданому рівні 1300 Вт (крива 1 на рис. 3.13, е), тоді як без обмеження вихідної потужності механічна потужність ВР значно зростає (крива 2 на рис. 3.13, е). Відповідно електрична потужність на виході ВЕУ теж буде обмежена на рівні 750-850 Вт (крива 1 на рис. 3.13, є), тоді як без обмеження зростатиме аж до 2000 Вт (крива 2 на рис. 3.13, ϵ). Зниження рівня електричної потужності нижче номінальної пов'язано зі зменшенням ККД генератора $\eta_{\rm CEIIM}$ (рис. 3.13, ж) через зростання його електромагнітного моменту та, відповідно, струмів якоря (рис. 3.13, з).

Як видно з отриманих осцилограм, система stall-регулювання забезпечує хорошу динаміку при зростанні та спаданні швидкості вітру. Проте, недоліком такого регулювання є підвищені втрати енергії в міді СГПМ і відповідне зниження вихідної електричної потужності ВЕУ через зниження ККД генератора.





Рис. 3.13. Осцилограми основних координат ВЕУ, отримані комп'ютерним симулюванням, які ілюструють вхід і вихід ВЕУ в режим обмеження потужності stall-регулюванням: а) тестова швидкість вітру, б) сигнал на вході РП, в) сигнал завдання на додатковий електромагнітний момент СГПМ, г) електромагнітний

момент СГПМ, д) кутова швидкість ВР, е) механічна потужність ВР, є) електрична потужність на виході ВЕУ, ж) ККД СГПМ, з) струми якоря СГПМ

3.3.2. Розроблення САК для feathering-регулювання. Перехід ВЕУ в режим роботи feathering-регулювання здійснюється зменшенням моменту навантаження ВР за допомогою СГПМ. При цьому, як видно з рис. 1.14, б, кутова швидкість ВР буде зростати. Автоматичним регулюванням можна легко стабілізувати електричну потужність на виході ВЕУ. Оскільки робота ВР у цьому режимі відбувається на стійкій ділянці його характеристики $M_{\rm BP}(\omega)$, то можливості автоматичного регулювання кращі, порівняно зі stall-регулюванням.

Як показує аналіз, для надійної роботи на великих вітрах найважливіше обмежити електричну потужність на виході СГПМ, оскільки це не призведе до його перегрівання та швидкого старіння ізоляції і в результаті – поломки. Механічні перевантаження на валу ВР–СГПМ цілком допустимі, що передбачено конструкцією ВЕУ. Це ж стосується й кутової швидкості як ВР, так і генератора.

Як показали дослідження, проведені комп'ютерним симулюванням, стабілізувати вихідну потужність СГПМ важко через непередбачуваний вплив на неї електромагнітного моменту: збільшення останнього здійснюється щляхом підвищення струмів якоря, що призводить до зниження вихідних напруг через втрати в обмотках. Це може супроводжувати як підвищення, так і зниження вихідної потужності генератора. Щоб усунути це протиріччя, прийнято рішення стабілізувати не вихідну, а електромагнітну потужність СГПМ, або, що ще простіше, завдання на цю потужність. Таке рішення представлено на структурній схемі розробленої САР для feathering-регулювання (рис. 3.14).

Ця система обмеження потужності працює подібно до системи stallрегулювання. У режимі неповного навантаження ВЕУ ($\omega < \omega_{\rm H}$) здійснюється оптимальне керування навантаженням СГПМ, а на виході РП є нульовий сигнал. При збільшенні швидкості вітру понад номінальне значення на виході РП формується від'ємний сигнал завдання на додатковий електромагнітний момент $M^*_{\rm em.P.dod}$, який призводить до зменшення навантаження СГПМ і збільшення його кутової швидкості до такого рівня, щоб забезпечити номінальне значення електромагнітної потужності генератора.



Рис. 3.14. Структурна схема САР, що забезпечує feathering-регулювання роботи ВЕУ на великих вітрах



Рис. 3.15. Комп'ютерна модель підсистеми керування роботою ВЕУ: оптимального керування за неповного навантаження та обмеження електромагнітної потужності СГПМ feathering-регулюванням

На рис. 3.15 приведено комп'ютерну модель підсистеми керування роботою ВЕУ, у якій розроблена в підрозділі 3.2 система оптимального керування роботою ВЕУ при її неповному навантаженні доповнена системою стабілізації електромагнітної потужності СГПМ feathering-регулюванням на великих вітрах. Ця потужність обмежується на номінальному рівні 1100 Вт. Параметри ПІ-регулятора потужності, визначені в ході комп'ютерного симулювання, є такими: $k_p = 0,50, k_i = 0,20.$

На рис. 3.16 приведено осцилограми комп'ютерного симулювання роботи системи обмеження потужності BEУ feathering-регулюванням. Тестова швидкість вітру (рис. 3.16, а) є такою ж, як і при stall-регулюванні. Вхідний сигнал на вході РП у режимах обмеження потужності задає додаткову кутову швидкість $\Delta \omega^*$, що в результаті роботи САР швидкості призводить до зменшення електромагнітного моменту СГПМ (рис. 3.16, б) і зростання кутової швидкості BP (рис. 3.16, в). Це призводить до зменшення механічної потужності BP (крива 1 на рис. 3.16, г) порівняно зі системою без обмеження потужності (крива 2 на рис. 3.16, г). Відповідно електрична потужність на виході BEУ буде стабілізуватися на рівні 1050 Вт (крива 1 на рис. 3.16, д порівняно з кривою 2, коли немає обмеження). ККД генератора $\eta_{\rm СППМ}$ у цьому режимі підвищується (рис. 3.16, е) внаслідок зменшення його електромагнітного моменту та, відповідно, струмів якоря (рис. 3.16, є).

Аналіз розроблених структур САК, а також результатів симулювання роботи ВЕУ на тестовому профілі вітру з переходом на вітри великої швидкості та поверненням до малих вітрів дав змогу зробити такі висновки.

1) перехід до stall-регулювання характеризує високий ступінь нелінійності об'єкта, що пов'язано з максимумом характеристики $M_{\rm BP}(\omega)$; тому задовільну роботу САК вдається забезпечити, лише контролюючи механічну потужність ВР, величину якої доводиться отримувати в режимі реального часу та розраховувати за виміряним наближеним значенням швидкості вітру; все це ускладнює побудову та роботу САК;





Рис. 3.16. Осцилограми основних координат ВЕУ, отримані комп'ютерним симулюванням, які ілюструють вхід і вихід ВЕУ в режим обмеження потужності feathering-регулюванням: а) тестова швидкість вітру, б) сигнал завдання на електромагнітний момент СГПМ, в) кутова швидкість ВР, г) механічна потужність ВР, д) електрична потужність на виході ВЕУ, е) ККД СГПМ, є) струм якоря СГПМ

2) feathering-регулювання характеризує мала нелінійність, що дає змогу безпосередньо контролювати вихідну електричну потужність ВЕУ та побудувати просту САР цієї потужності;

3) в режимі stall-регулювання значно зростає механічний момент на валу ВР, проте знижується його кутова швидкість, тоді як при feathering-регулюванні, навпаки, механічний момент знижується, а кутова швидкість значно зростає; виходячи з цього, для реалізації вказаних режимів обмеження потужності ВЕУ необхідно по-різному проектувати ВР, при цьому простішим є збільшення механічного моменту, ніж кутової швидкості;

4) при stall-регулюванні в результаті значного зростаня електромагнітного моменту СГПМ збільшуються його втрати в міді, що призводить до значного зменшення ККД генератора; при feathering-регулюванні, навпаки, втрати в міді знижуються, але зростають втрати в сталі через збільшення частоти ЕРС, проте вони в СГПМ не відіграють суттєвого значення; це дає змогу в режимі обмеження потужності отримувати більше електричної енергії на виході ВЕУ за stallрегулювання, ніж за feathering-регулювання;

5) завдяки безпосередньому контролюванню електричної потужності на виході СГПМ при feathering-регулюванні її значення можна стабілізувати на заданому номінальному рівні незалежно від зміни швидкості вітру в діапазоні високих швидкостей; при цьому надлишкова енергія нагромаджуватиметься у вигляді кінетичної енергії обертових частин ВР і СГПМ, а потім забиратиметься через подальше номінальне навантаження генератора; все це забезпечує значно кращу стабільність генерованої ВЕУ електричної потужності за feathering-регулювання порівняно зі stall-регулюванням.

Не дивлячись на низку вказаних переваг feathering-регулювання в порівнянні зі stall-регулюванням, значне зростання кутової швидкості ВР при обмеженні його потужності в режимі feathering-регулювання є проблематичним у виконанні. Натомість зростання електромагнітного моменту СГПМ, що є необхідним для stall-регулювання, є цілком допустимим, зважаючи на перевантажувальну здатність генератора. Крім того, швидке керування цим моментом забезпечує швидкодію переходу в режим обмеження потужності, що є важливим при роботі на турбулентних вітрах. Таким чином, проведений аналіз дає змогу зробити вибір на користь способу stall-регулювання для обмеження потужності ВЕУ при її роботі на високих швидкостях вітру.

3.4. Дослідження ефективності генерування електроенергії в малопотужних ВЕУ з ВВО комп'ютерним симулюванням

3.4.1. Робота ВЕУ на турбулентних вітрах малої швидкості. Порівняння енергетичної ефективності ВЕУ, керованої за принципом ОТС, і системою керування з комбінованим регулятором, проведено комп'ютерним симулюванням їхньої роботи протягом 300 с на турбулентному вітрі зі середньою швидкістю 3 м/с (рис. 3.17) при температурі навколишнього середовища –5 °C. Для отримання адекватних результатів симулювання починається та закінчується в усталеному режимі роботи при стабільній швидкості вітру 3 м/с.



Рис. 3.17. Осцилограма змодельованого турбулентного вітропотоку з середньою швидкістю вітру 3 м/с

На рис. 3.17–3.21 наведено отримані осцилограми основних координат роботи ВЕУ. Як видно з осцилограм кутової швидкості (рис. 3.18), ВЕУ, керовану розробленим комбінованим регулятором, характеризує краща динаміка, порівняно з керуванням за класичним принципом ОТС, і значно краще наближення до оптимальної з електроенергетичної точки зору кутової швидкості ВР.



Рис. 3.18. Осцилограми кутової швидкості ВР: 1 – оптимальна з електроенергетичної точки зору $\omega_{opt.e}$; 2 – ВЕУ, керованої за принципом ОТС;





Рис. 3.19. Осцилограми коефіцієнта відбору потужності ВР C_P: 1 – максимально можливого з аеродинамічної точки зору; 2 – для ВЕУ, керованої за принципом ОТС (а) та керованої комбінованим регулятором (б)

З аеродинамічної точки зору система класичного ОТС керування має гірше наближення до оптимального відбору потужності вітру (рис. 3.19, а) порівняно з розробленою (рис. 3.19, б). Показані на рис. 3.20 осцолограми електричної потужності на виході ВЕУ та втрат потужності в СГПМ демонструють значно вищу швидкодію автоматичного керування комбінованого регулятора порівняно з регулюванням за принципом ОТС. При цьому втрати енергії в обмотках СГПМ дещо зростають (рис. 3.21, б), проте сумарна отримана за час симулювання на виході ВЕУ електрична енергія є більшою порівняно з керуванням за принципом ОТС на 4,9% (рис. 3.21, а).



Рис. 3.20. Осцилограми електричної потужності на виході ВЕУ (а) та потужності втрат в генераторі (б) за різних систем керування:

1 – за принципом ОТС, 2 – з комбінованим регулятором



Рис. 3.21. Осцилограми електричної енергії, інтегрованої за час роботи ВЕУ (а) та втрат енергії в обмотках генератора (б) за різних систем керування:

1 – за принципом ОТС, 2 – з комбінованим регулятором

3.4.2. Робота ВЕУ на турбулентних вітрах великої швидкості. Для аналізу роботи систем обмеження потужності ВЕУ за їхньої роботи на вітрах великої швидкості проведено комп'ютерне симулювання. Для цього використана модель турбулентної швидкості вітру з середнім значенням 9 м/с (рис. 3.22, а). В інтервалі часу від 60 до 100 с швидкість вітру очевидно перевищує номінальне для досліджуваної ВЕУ значення 10 м/с.



Рис. 3.22. Осцилограми основних координат ВЕУ, отримані комп'ютерним симулюванням, які ілюструють роботу ВЕУ в режимі обмеження потужності stall-регулюванням на турбулентному вітрі
На рис. 3.23 позначено: а) швидкість турбулентного вітропотоку, б) кутова швидкість ВР та СГПМ, в) механічна потужність ВР, г) електрична потужність на виході ВЕУ (1 – без обмеження потужності, 2 – з обмеженням потужності).

У системі з обмеженням потужності stall-регулюванням у вказаному інтервалі часу кутова швидкість ВР зменшується порівняно з оптимальним значенням для системи без обмеження потужності (рис. 3.22, б), що зумовлює суттєве зниження механічної потужності ВР (рис. 3.22, в). Значно знижується й середнє значення електричної потужності на виході ВЕУ (рис. 3.22, г), проте останню характеризують значні короткочасні піки величиною 1500-2000 Вт, які необхідні для входження в режим stall-регулювання. Ці піки мають місце навіть за короткочасних поривів швидкості вітру (моменти часу 125, 170, 197 с), коли вихідна потужність ВЕУ в системі без її обмеження не перевищує номінального значення 1000 Вт. Це, без сумніву, негативно впливає на роботу ВЕУ.

У системі з обмеженням потужності feathering-регулюванням інтервалі часу 60-100 с на тому ж тестовому турбулентному вітрі (рис. 3.23, а) кутова швидкість ВР зростає порівняно з оптимальним значенням для системи без обмеження потужності (рис. 3.23, а). Проте механічна потужність, яка відбирається ВР від вітру, зменшується незначно (рис. 3.22, б). Враховуючи те, що вихідна електрична потужність ВЕУ стабілізується на номінальному рівні (рис. 3.22, в), решта потужності ВР, яка відбирається від вітрового потоку, нагромаджується у вигляді кінетичної енергії ВР. В інтервалі часу 97-123 с, коли швидкість вітру вже знизилася до рівня, меншого за номінальне значення, ВР ще продовжує перебувати в режимі обмеження потужності, тому що вихідна електрична потужність підтримується на номінальному рівні за рахунок вивільнення кінетичної енергії, набутої ВР, при зниженні його кутової швидкості. Це дещо знижує кількість генерованої ВЕУ електроенергії, проте забезпечується стабільність генерованої електричної потужності.



Рис. 3.23. Осцилограми основних координат ВЕУ, отримані комп'ютерним симулюванням, які ілюструють роботу ВЕУ в режимі обмеження потужності шляхом feathering-регулювання на турбулентному вітрі: а) кутова швидкість ВР і СГПМ, б) механічна потужність ВР, в) електрична потужність на виході ВЕУ (1 – без обмеження потужності, 2 – з обмеженням потужності)

3.5. Висновки до розділу

1. Врахування в системі керування ВЕУ з ВВО залежності аеродинамічних параметрів ВР від зміни умов роботи – перш за все, швидкості вітру і температури повітря – дало змогу знайти оптимальні з точки зору отримуваної на виході ВЕУ електричної потужності значення коефіцієнта регулювання за збуренням кутової швидкості ВР $k_{\rm M}(V_{\rm B}, \mathcal{G})$. Це забезпечило, порівняно з традиційним бездавачевим керуванням за принципом ОТС, зростання генерованої ВЕУ електричної потужності в усталених режимах роботи, яке особливо проявляється на малих вітрах і може досягати понад 7% (рис. 3.8).

2. Застосування нечіткого коректора сприяло простій та ефективній реалізації отриманих складних функціональних залежностей коефіцієнта регулювання за збуренням від найбільш дієвих координат, що характеризують умови роботи ВЕУ, – швидкості вітру й температури повітря.

3. Для прискорення перехідних процесів при роботі ВЕУ на турбулентних вітрах комбінований запропоновано створити регулятор оптимального навантаження ВЕУ, додавши до регулювання за збуренням швидкості вітру ще й регулювання за відхиленням кутової швидкості ВР від усталеного оптимального значення. Підбір оптимального значення, з точки зору мінімізації сумарних аеродинамічних втрат ВР і втрат в міді СГПМ, коефіцієнта підсилення забезпечив прискорення регулювання диференціатора кутової швидкості порівняно із системою за принципом ОТС, що додатково підвищило генеровану електричну енергію, особливо на малих вітрах.

4. Задля обмеження електричної потужності СГПМ при роботі ВЕУ на швидкостях вітру, що перевищують номінальне значення, розроблено структури регуляторів, які забезпечують зменшення швидкохідності ВР порівняно з оптимальною (stall-регулювання) та її збільшення (feathering-регулювання). Проведені дослідження роботи ВЕУ у вказаних режимах дали змогу оцінити переваги та недоліки кожного з них і виробити відповідні рекомендації.

Ефективність обмеження потужності підтверджена комп'ютерним симулюванням роботи ВЕУ на турбулентних вітрах з поривами швидкості.

5. Давач швидкості вітру в розробленій системі комбінованого керування відіграє допоміжну роль, коректуючи базове значення коефіцієнта $k_{\rm M}$ при зміні швидкості вітру та забезпечуючи інформацію для естиматора механічної потужності ВР при stall-регулюванні. Виходячи з цього, до точності вимірювання швидкості вітру не ставлять високі вимоги, тому давач може бути простим, недорогим і встановлюватися безпосередньо біля ВР.

РОЗДІЛ 4

СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ВЕУ

Розділ присвячено дослідженням, спрямованим на створення різних варіантів електротеплових ВЕУ, які дають змогу генерувати з вітру два види енергії, однаково потрібні в побуті. Водночас з розширенням функціональних можливостей для автономних електротеплових ВЕУ розроблено варіанти реалізації енергоефективних і водночас недорогих САК, що забезпечує, разом із суттєвим зменшенням ємності АБ, значне зниження вартості ВЕУ та, відповідно, терміну її окупності.

Основні результати розділу опубліковано в роботах автора [22, 23, 37, 38, 39, 40, 41, 123].

Як описано в підрозділі 1.2.3, для генерування теплової енергії з електричної енергії, яку виробляє генератор ВЕУ (dump energy), застосовують нескладні електричні схеми. Проте при традиційному скиданні енергії ставлять лише задачу навантаження ВЕУ задля обмеження її швидкості на великих вітрах. В електротепловій ВЕУ, генеруючи теплову енергію, САК повинна виконувати набагато складніші завдання: оптимального навантаження ВЕУ на малих і середніх вітрах та обмеження потужності ВЕУ – на великих. Фактично це ті ж завдання, що й при генеруванні електричної енергії, проте для генерування теплової енергії їхнє виконання матиме свою специфіку та очікувано простішу й дешевшу реалізацію.

Для математичного моделювання та дослідження процесів у електротеплових ВЕУ доцільно розглядати ВР більшої потужності – 5 і 10 кВт, основні параметри яких наведено в табл. 2.2.

4.1. Квазіоптимальне керування автономною ВЕУ з отриманням теплової енергії методом періодичного навантаження СГПМ

Як показали дослідження описані у 3-му розділі, а також результати, отримані іншими авторами [88, 113], в умовах турбулентних вітрів кутова швидкість BP BBO. через його суттєво вищу В порівнянні 3 3 горизонтальноосьовими ВР механічну інерційність, не встигає змінюватися відповідно до зміни швидкості вітру, не зважаючи на роботу САК оптимального навантаження генератора. Це призводить до деяких аеродинамічних втрат, проте кількість генерованої електричної енергії залишається досить високою через невисокі втрати енергії в генераторі. Така ситуація зумовила пропозицію реалізації простого за виконанням способу регулювання навантаження СГПМ періодичним підключенням і відключенням до обмоток якоря генератора ТЕНів, які встановлені в тепловому акумуляторі [38].

Основним завданням цього способу є забезпечення такого сумарного електричного та механічного періодичного навантаження генератора, при якому кутова швидкість ВР коливатиметься в околі ТМВП за неповного навантаження ВЕУ, забезпечуючи квазіоптимальне керування її роботою. Для цього встановимо робочу зону в околі оптимальної швидкохідності ВР $\lambda_{opt} = 3,67$ – навантаження вмикатиметься при $\lambda_{on} = 4,46$, а вимикатиметься при $\lambda_{off} = 3,02$ (рис. 4.1). Значення λ_{off} та λ_{on} отримані з кривої $C_{\rm P}(\lambda)$, що відповідає виразові (1.14), для значення 0,95 $C_{\rm Pmax}$.

Електротеплова ВЕУ може поєднувати вказану вище підсистему генерування теплової енергії періодичним навантаженням СГПМ на ТЕНи та підсистему генерування електричної енергії, яку ми розглядали в розділі 3. При цьому ВЕУ матиме можливість генерувати з вітрової енергії лише один з вказаних видів енергії, або одразу обидва в потрібних співвідношеннях. Проте така електротеплова ВЕУ буде досить дорогою. Нами запропонована набагато простіша й дешевша система електротеплової ВЕУ, хоча й з обмеженими можливостями щодо поєднання генерування обох видів енергії [22].



Рис. 4.1. Зона робочої швидкохідності ВР при його періодичному навантаженні

Як було зазначено в розділі 1, у найпростіших і найдешевших автономних ВЕУ застосовують пасивні системи керування. Такі ВЕУ складаються з ВР, СГПМ, діодного випрямляча та електрохімічних АБ, до яких підключаються споживачі електроенергії [152]. Оскільки швидкість вітру, а, відповідно, і частота обертання ВР не постійні, вихідна напруга СГПМ також змінюється, тому АБ починають заряджатися тільки після перевищення їхньої напруги випрямленою напругою обмоток якоря генератора. Щоб не допустити перевантаження АБ при високих швидкостях вітру, їхню напругу вибирають досить високою. Через це при низьких і середніх швидкостях вітру заряджання АБ можливе лише при розгоні ВР до високих значень кутової швидкості, які є значно вищими від оптимальних для цих швидкостей вітру. У цьому причина низької енергетичної ефективності роботи ВЕУ при низьких швидкостях вітру.

Відповідно до запропонованого підходу передбачено таке співвідношення напруг АБ і СГПМ, щоб ВЕУ з пасивним керуванням працювала близько до ТМВП при швидкостях вітру, вищих за середню. Як показали дослідження [156], саме на таких швидкостях вітру можна отримати найкраще узгодження характеристики навантаження ВР генератором з пасивною системою керування з кривою оптимального навантаження ВР.

Для забезпечення високої енергетичної ефективності роботи ВЕУ при низьких і середніх швидкостях вітру, коли АБ заряджається неефективно і ВР може розганятися до кутової швидкості, яка значно перевищує оптимальну, в роботі [156] застосовано активну систему керування з малопотужним DC-DC перетворювачем. В електротепловій ВЕУ на низьких і середніх швидкостях вітру СГПМ навантажуватиметься через періодичне підключення й відключення до нього ТЕНів, встановлених у тепловому акумуляторі. Це здійснюється автоматично, наприклад, за допомогою трифазного електромагнітного контактора або двох напівпровідникових ключів – симісторів, а керування періодичністю підключення відбувається за сигналами про частоту обертання генератора або частоту його вихідної напруги. При цьому система автоматичного керування забезпечуватиме роботу ВР в околі оптимальних для конкретної швидкості вітру частот обертання.

Перехід від режиму періодичного навантаження генератора до режиму прямого заряджання АБ може відбуватися за швидкості вітру, наприклад, 7 м/с, що найпростіше здійснювати за величиною струму АБ. При повному зарядженні АБ система має працювати лише в режимі перетворення електричної енергії в теплову.

Баланс моментів на валу ВР описує рівняння (2.14). Коли ВР розганяється під дією вітру без електричного навантаження СГПМ, то $M_{\rm em} = 0$. Підставляючи в рівняння (2.14) вираз для $M_{\rm BP}$ (1.12), з врахуванням (1.8), отримаємо таку залежність між кутовим прискорення ВР і його кутовою швидкістю в момент досягнення ВР швидкохідності $\lambda_{\rm on}$:

$$\varepsilon_{1} = \frac{1}{J_{\Sigma}} \left[0.5 \rho_{\Pi} A r^{3} \frac{C_{P}(\lambda_{on})}{\lambda_{on}^{3}} \omega^{2} - b \omega - M_{c} \right].$$

$$(4.1)$$

Залежність (4.1) можна покласти в основу визначення моменту підключення навантаження до СГПМ, коли кутове прискорення ВР при його розгоні без

навантаження зменшиться до такої величини, щоб виконувалася умова $\varepsilon \leq \varepsilon_1(\omega)$. Кутове прискорення обчислюється в режимі реального часу за допомогою цифрового диференціювання виміряної кутової швидкості генератора $\varepsilon = \Delta \omega / \Delta t$, а результат порівнюється з обчисленим за виразом (4.1) на підставі тієї ж кутової швидкості генератора.

Умову для відключення навантаження СГПМ можна сформулювати як постійну частину від значення кутової швидкості, при якій відбулося підключення навантаження: $\omega_{off} < \omega_{on}/k$, де постійне значення коефіцієнта k можна взяти, наприклад, таким: $k = \lambda_{on}/\lambda_{off} = 1,477$. Це не внесе значної похибки у визначення моменту часу відключення навантаження, оскільки тривалість навантаження невелика, і за цей час середня швидкість вітру значно не зміниться.

Після підключення до обмотки якоря СГПМ з'єднаних у зірку ТЕНів з активними опорами $R_{\rm T}$ генератор почне створювати на валу ВР момент навантаження, і в рівнянні балансу моментів (2.14) з'явиться додаткова складова – електромагнітний момент генератора $M_{\rm em}$. Величина цього моменту для СГПМ визначає рівняння

$$M_{\rm em} = \frac{3}{2} p \Phi_{\rm m} I_{\rm q}, \qquad (4.2)$$

а значення складової вектора струму якоря вздовж осі q можна знайти за виразом

$$I_{\rm q} = I\cos\theta, \tag{4.3}$$

де θ – кут між векторами ЕРС і струму якоря СГПМ.

Модуль вектора ЕРС визначає рівняння (2.15), а модуль вектора струму якоря СГПМ можна знайти за таким рівнянням:

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{p\Phi_{\rm m}\omega}{\sqrt{\left(R + R_{\rm r}\right)^2 + \left(p\omega L\right)^2}},$$
(4.4)

де Z – модуль комплексного опору кола однієї фази СГПМ.

Значення кута θ становить

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{p \omega L}{R + R_{\scriptscriptstyle T}} \,. \tag{4.5}$$

Підставляючи вирази (4.3)-(4.5) у рівняння (4.2) і згодом отриманий вираз для $M_{\rm em}$ – у рівняння (2.14) й переходячи від ω до безрозмірної змінної швидкохідності ВР λ , отримуємо таке диференціальне рівняння, що описує зміну швидкохідності ВР після підключення до генератора ТЕНів:

$$\frac{d\lambda}{dt} = 0.5 \,\mu_{\rm II} \frac{Ar^2}{J_{\Sigma}} V_{\rm B} \frac{C_{\rm P}(\lambda)}{\lambda} - \frac{b}{J_{\Sigma}} \lambda - M_{\rm c} \frac{r}{V_{\rm B} J_{\Sigma}} - \frac{3}{2} \cdot \frac{(p\Phi_{\rm m})^2}{J_{\Sigma}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{(R+R_{\rm T})^2 + (p\frac{V_{\rm B}}{r}L)^2 \lambda^2}} \cos\left(\arctan\frac{p\frac{V_{\rm B}}{r}L\lambda}{R+R_{\rm T}}\right).$$
(4.6)

Початкові умови для інтегрування диференціального рівняння (4.6) такі: при t = 0 швидкохідність ВР $\lambda = \lambda_{on}$.

Після відключення ТЕНів у рівнянні (4.6) останній доданок буде рівний нулеві, тому отримаємо диференціальне рівняння виду:

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t} = 0.5\,\mu_{\mathrm{II}}\,\frac{A\,r^2}{J_{\Sigma}}V_{\mathrm{B}}\,\frac{C_{\mathrm{P}}(\lambda)}{\lambda} - \frac{b}{J_{\Sigma}}\,\lambda - M_{\mathrm{c}}\,\frac{r}{V_{\mathrm{B}}\,J_{\Sigma}}\,.$$
(4.7)

Початкові умови для інтегрування диференціального рівняння (4.7) такі: при t = 0 швидкохідність ВР $\lambda = \lambda_{off}$.

Для аналізу електромеханічних процесів за періодичного навантаження ВР, у середовищі Mathcad розроблено програму (Додаток Б), яка дає змогу за заданими параметрами ВР і СГПМ чисельного інтегруванням нелінійних диференціальних рівнянь (4.6) і (4.7) отримати всі необхідні залежності та вибрати величину активного опору ТЕНів $R_{\rm T}$. Запропонована методика вибору цього опору спирається на такі закономірності роботи системи періодичного навантаження ВР.

За сталого значення опору $R_{\rm T}$ перебіг періодичного навантаження залежить від швидкості вітру: на низьких швидкостях вітру ВР довго розганяється й швидко гальмується, а на високих швидкостях вітру – навпаки, швидко розганяється й довго гальмується. Час гальмування безпосередньо залежить від значення опору $R_{\rm T}$ – зменшення величини опору призводить до пришвидшення

гальмування. Проте це знижує електричний ККД СГПМ, який характеризує енергетичну ефективність передачі генерованої електричної енергії до ТЕНів та обчислюється за виразом

$$\eta_{\rm G} = \frac{R_{\rm T}}{R_{\rm T} + R}.\tag{4.8}$$

Збільшення величини $R_{\rm T}$, для підвищення $\eta_{\rm G}$ призводить до того, що періодичне навантаження застосовується лише до певного значення швидкості вітру. Зі збільшенням цієї швидкості періодичне навантаження переходить у неперервне, оскільки швидкохідність ВР не падає нижче від $\lambda_{\rm off}$. Таке неперервне навантаження ВР зі збільшенням швидкості вітру спричинятиме щораз більше відхилення від оптимального значення.

Таким чином, величину опору $R_{\rm T}$ необхідно обирати, виходячи з компромісу між максимальною швидкістю вітру, за якої ще можливе квазіоптимальне періодичне навантаження ВР, і величиною ККД генератора (4.8). Результати досліджень роботи дослідної ВЕУ потужністю 5,0 кВт на різних швидкостях вітру, отримані за допомогою програми Mathcad (Додаток Б), показано на (рис. 4.2).

Параметри ВР і СГПМ для такої ВЕУ взято відповідно з табл. 2.2 і 2.3. Наведені на рис. 4.2 результати отримано для значення опору ТЕНів $R_{\rm T} = 1,1$ Ом, за якого ККД генератора становить $\eta_{\rm G} = 0,88$, а максимальне значення швидкості вітру, за якого ще можливе періодичне навантаження, наближається до 7 м/с. На середній швидкості вітру 5 м/с час розгону та гальмування ВР приблизно однаковий і близький до 5 с, що видно з часових залежностей швидкохідності ВР при його розгоні $\lambda_{\rm p}$ та гальмуванні $\lambda_{\rm r}$ (рис. 4.2, б). Тепловий потік (потужність $P_{\rm r}$), що виділяється в ТЕНах під час одного гальмування ВР за різних значень швидкості вітру змінюється в таких межах: а) 3,5 м/с – з 880 Вт до 430 Вт, б) 5 м/с – з 1720 Вт до 840 Вт, в) 6,8 м/с – з 2970 Вт до 1500 Вт. При цьому момент ВР на різних швидкостях вітру здійснює коливання в околі оптимального значення M_{opt} в діапазонах $M_{on} - M_{off}$, показаних на рис. 4.3.



Рис. 4.2. Результати обчислень зміни в часі швидкохідності ВР при підключенні та відключенні до генератора ТЕНів, а також вихідної теплової потужності, що виділяється в них, для дослідної електротеплової ВЕУ потужністю 5 кВт за різних значень швидкості вітру: а) 3,5 м/с, б) 5,0 м/с, в) 6,8 м/с

На рис. 4.4 показана функціональна схема запропонованої електротеплової ВЕУ з розробленою системою керування, яка працює так [40].



Рис. 4.3. Відображення діапазонів зміни моменту $M_{on} - M_{off}$ на залежностях моменту, що розвиває ВР дослідної ВЕУ потужністю 5 кВт, від кутової швидкості ВР при різних швидкостях вітру



Рис. 4.4. Функціональна схема системи автономної електротеплової ВЕУ з періодичним навантаженням ВР

ВР 1 під дією вітру обертає ротор СГПМ 2. Трифазна напруга з обмоток статора генератора випрямляється некерованим діодним випрямлячем 3 і прикладається до АБ 4. Заряджання останньої струмом починається при перевищенні її напруги випрямленою напругою генератора, тобто при високих швидкостях вітру. При низьких і середніх швидкостях вітру відбір енергії від генератора 2 здійснюється на ТЕНи 6, які періодично підключаються до обмоток якоря генератора за допомогою електронних ключів 5, що спрацьовують за сигналами системи керування, алгоритм роботи якої спирається на дані давача частоти обертання генератора 7.

Диференціатор 9 з незначною дискретою часу визначає похідну від кутової швидкості генератора, тобто поточне значення кутового прискорення є, і у порівняльному пристрої 10 порівнює його зі значенням ε_1 , отриманим у функціональному перетворювачі 11, в якому задана бажана залежність $\varepsilon_1(\omega)$. При виконанні умови $\varepsilon < \varepsilon_1$ поступає одиничний сигнал на вхід логічного елемента «І» 16 і на керуючий вхід запам'ятовуючого пристрою 13, який запам'ятає значення кутової швидкості генератора ω_{on} у цей момент, поділене на стале значення *k* дільника 12. Оскільки в нормальному стані пристрій затримки 15 видає на виході одиничний сигнал, який поступає на вхід логічного елемента «І» 16, на виході останнього також появиться одиничний сигнал. Цей сигнал, поступивши на S-вхід R-S-тригера 17, перекине його в одиничний стан (на Q-виході), який далі поступає на один з входів логічного елемента «І» 18. Якщо струм заряду АБ 4, який контролює давач струму 8, не є більшим за значення задавача струму АБ 20, на виході логічного елемента «І» 18, дає дозвіл на керування електронними ключами 5. Тому з переходом R-S-тригера 17 в одиничний стан електронні ключі 5 підключать ТЕНи 6 до обмотки якоря СГПМ 2. Під дією створеного навантаження частота обертання генератора почне знижуватися, поки не досягне значення, збереженого у запам'ятовуючому пристрої 13. Тоді умова на порівняльному пристрої 14 справдиться, і на його виході появиться одиниця, яка, поступивши на R-вхід R-S-тригера 17, перекине його в нульовий стан (на Q-

виході), який розімкне електронні ключі 5, відключивши навантаження генератора. Також одиничний сигнал, що появиться на виході порівняльного пристрою 14, увімкне пристрій затримки 15, на виході якого появиться логічний нуль, який створить заборону увімкнення навантаження на заданий час затримки. Це здійснено для надання можливості набору частоти обертання ВР 1 після вимкнення навантаження, а також щоб уникнути занадто частого спрацьовування електронних ключів 5 в умовах вітрів з високою турбулентністю.

Ключами S1 та S2 задають відповідно режими генерування електричної й теплової енергії. Це може відбуватися вручну або автоматично. В останньому випадку необхідно створити просту систему енегетичного менеджменту, наприклад, таку, як показана на рис. 4.4, що забезпечує заряджання AБ 4 на високих швидкостях вітру і періодичне навантаження СГПМ 2 на ТЕНи 6 – на малих і середніх. При великому вітрі частота обертання генератора 2 зростає, а відповідно і напруга в обмотках його якоря, яка після випрямлення некерованим випрямлячем 3 перевищує напругу АБ 4, забезпечуючи її заряджання. При зниженні струму заряду батареї до значення, заданого у задавачі 20 мінімального струму АБ на виході 3-го порівняльного пристрою 19 з'явиться логічна одиниця, яка подасть на логічний елемент 18 дозвіл на відкривання електронних ключів 5, забезпечуючи режим генерування теплоти.

Давачем частоти обертання генератора, крім традиційного пристрою, наприклад, оптичного енкодера, може слугувати електронний пристрій, що визначає частоту обертання генератора на підставі частоти його напруги. Алгоритм такого обчислення може бути реалізовано в мікроконтролері, до входу якого слід подати виміряну давачем напругу якоря СГПМ.

Для визначення моменту підключення ТЕНів до СГПМ необхідна залежність $\varepsilon_1(\omega)$, яка для ВР дослідної ВЕУ потужністю 5 кВт, розрахована за виразом (4.1) та апроксимована з коефіцієнтом кореляції 0,99999 з допомогою програми CurveExpert 1.3 квадратичною функцією

$$\varepsilon_1 = -0.051036 - 0.0015113\omega + 0.010175\omega^2.$$
(4.9)

Для перевірки працездатності запропонованої керування системи електротепловою ВЕУ реалізовано комп'ютерне симулювання роботи всієї системи в середовищі MATLAB/Simulink (рис. 4.5). Для цього було використано розроблені в розділі 2 комп'ютерні моделі підсистем: ВР – Wind Turbine Subsystem, CГПМ – Permanen Magnet Synchronous Machine, турбулентного вітропотоку – WIND та обчислення електромагнітної потужності СГПМ – Рет Subsystem. Навантаженням СГПМ служать 3 ТЕНи Rt, з'єднані зіркою, які підключають до обмотки якоря генератора електронними ключами Ideal Switch 1-3, та акумуляторна батарея В з внутрішнім опором Rb, яка підключається електронним ключем Ideal Switch 4 до виходу трифазного діодного моста Universal Bridge. У моделі, для дослідження, передбачено ручні ключі Manual Switch ta Manual Switch 1, якими можна задати дозвіл на роботу BEУ в режимах, відповідно, генерування теплової та електричної енергії.

Комп'ютерна модель підсистеми, що керує періодичним навантаженням СГПМ на ТЕНи **Puls Control Subsystem** (рис. 4.6), розроблена відповідно до описаної вище функціональної схеми електротеплової ВЕУ (рис. 4.4). Новими елементами цієї підсистеми є тригер S-R Flip-Flop1, який дає дозвіл на роботу системи періодичного навантаження, якщо кутова швидкість ВР буде більшою за 4,0 рад/с (задається в блоці w_start), і забороняє роботу, коли ця швидкість падає нижче 3,0 рад/с (задається в блоці w_stop).

Для вимірювання середнього значення теплової потужності, що виділяється в ТЕНах при їхньому періодичному включенні, застосовано підсистему **Subsystem P Measurement** (рис. 4.7). В усталеному режимі блок Step дає дозвіл на вимірювання, і з поступленням на вхід puls з системи керування чергового імпульсу на включення навантаження запускаються інтегратори Integrator1 та Integrator2, які відповідно інтегрують в часі потужності навантаження СГПМ та одиничного сигналу. На виході першого інтегратора отримуються енергія одного періоду навантаження (цифровий індикатор Energy pulses), а на виході другого – тривалість цього періоду в секундах. Після ділення першого сигналу на другий отримується значення середньої потужності за період.



Рис. 4.5. Комп'ютерна модель дослідної електротеплової ВЕУ з періодичним навантаженням СГПМ



Рис. 4.6. Комп'ютерна модель підсистеми керування періодичним навантаженням СГПМ на ТЕНи (**Puls Control Subsystem**)



Рис. 4.7. Комп'ютерна модель підсистеми вимірювання середнього значення теплової потужності (Subsystem P Measurement)

На рис. 4.8 приведено отримані на комп'ютерній моделі часові залежності основних координат досліджуваної електротеплової ВЕУ в режимі періодичного навантаження СГПМ. Тестова швидкість вітру змодельована трьома інтервалами зі сталими значеннями 3,5, 5,0 і 6,8 м/с (рис. 4.8, а), досліджені в математичній моделі (рис. 4.2). Система керування шляхом періодичного підключення ТЕНів створює електромагнітний момент СГПМ (рис. 4.8, б), при цьому кутова швидкість ВР з генератором коливається, як показує рис. 4.8, в. Швидкохідність ВР теж коливається в заданому діапазоні $\lambda_{on} - \lambda_{off}$ (рис. 4.8, г), а значення коефіцієнта потужності перебуває на заданому рівні (0,95…1,0) C_{Pmax} (рис. 4.8, д). Отримувана теплова потужність (рис. 4.8, е) змінюється в математичній моделі (рис. 4.2).





Рис. 4.8. Часові залежності основних координат досліджуваної електротеплової ВЕУ в режимі періодичного навантаження СГПМ

Проведені на розробленій комп'ютерній моделі дослідження показали, що для дослідної електротеплової ВЕУ з конкретними параметрами ВР і СГПМ найкращим, з точки зору величини отримуваної потужності генерованої електроенергії в діапазоні швидкостей вітру 7-10 м/с при застосованому пасивному способі заряджання АБ, є значення напруги АБ 84 В (12 В ×7). При цьому швидкохідність ВР наближається до оптимального значення $\lambda_{opt} = 3,675$, а коефіцієнт потужності – до свого максимального значення $C_{Pmax} = 0,3514$ (рис. 4.9). За швидкостей вітру, нижчих 7 м/с, C_P починає стрімко падати. Мінімальне значення ККД генератора, отримане за швидкості вітру 10 м/с, становить 0,87. Збільшення напруги АБ призведе до подальшого погіршення ефективності відбору ВР потужності від вітру на середніх і малих його швидкостях, а зниження – до зменшення ККД генератора на вітрах з високою швидкістю.



Рис. 4.9. Залежності швидкохідності та коефіцієнта відбору потужності вітру ВР у дослідній електротепловій ВЕУ з АБ напругою 84 В в режимі генерування електричної енергії

Проведені на комп'ютерній моделі імітаційні дослідження дали змогу визначити криві потужності дослідної електротеплової ВЕУ в режимах генерування лише електричної енергії P_{en} (окремо), лише теплової P_{T} (окремо) й одночасного генерування обох видів енергії – P_{en} (спільно) та P_{T} (спільно) (рис. 4.10). Отримані результати показують, що електротеплова ВЕУ може ефективно працювати в режимі генерування теплової енергії в усьому робочому діапазоні швидкостей вітру. При цьому за швидкості вітру нижче 6,8 м/с відбувається періодичне підключення ТЕНів, яке на вищих швидкостях вітру переходить у неперервне підключення, яке забезпечує близьке до оптимального навантаження СГПМ. Режим генерування електричної енергії є ефективним на середніх і високих швидкостях вітру, починаючи з 6 м/с. На найвищих швидкостях вітру можливе також ефективне генерування обох видів енергії. Це дає змогу побудувати просту систему енергетичного менеджменту, яка може містити вказані режими без будь-якої зміни описаного алгоритму роботи системи автоматичного керування. Недолік такої простої системи електротеплової ВЕУ – неможливість обмеження наявними засобами потужності на високих швидкостях вітру. Для цього необхідно застосувати якісь додаткові пристрої, наприклад, механічні гальма.



Рис. 4.10. Криві потужності дослідної електротеплової ВЕУ в режимах генерування різних видів енергії

На рис. 4.11 наведено результати імітаційного комп'ютерного симулювання роботи запропонованої системи електротеплової ВЕУ потужністю 5 кВт.





Рис. 4.11. Осцилограми, отримані в результаті імітаційного комп'ютерного симулювання роботи запропонованої системи керування електротепловою ВЕУ

На рис. 4.11, а позначено часові інтервали, в яких система енергетичного менеджменту задає необхідні режими генерування потрібних видів енергії. Тестову швидкість вітру (рис. 4.11, б) задано такою функцією:

$$V_{\rm B} = V_{\rm B,cep} + 3\sin(\omega_{\rm B}t - 1) - 3\sin(8\omega_{\rm B}t + 1,3), \qquad (4.10)$$

де $V_{\rm B,cep} = 6$ м/с – середня швидкість вітру;

 $\omega_{\rm B} = \pi/300 \, {\rm c}^{-1}$ – нижня кругова частота зміни швидкості вітру.

В інтервалах, коли відбувається генерування лише теплової енергії, за малих швидкостей вітру (0...120 с та 400...700 с) працює система періодичного навантаження СГПМ, а зі збільшенням швидкості вітру понад 6,8 м/с – генерування теплової енергії відбувається вже за постійного підключення ТЕНів. Проте при зниженні кутової швидкості ВР нижче 3 рад/с (рис. 4.11, г) система періодичного навантаження припиняє роботу. Коректну роботу системи періодичного навантаження видно з осцилограми швидкохідності ВР (рис. 4.11, д).

При генеруванні електричної енергії (в інтервалі 200...400 с) електромагнітний момент має деякі пульсації, що зумовлено пульсаціями струмів якоря генератора (рис. 4.11, ϵ), що працює на нелінійне навантаження – діодний міст. Генеровані ВЕУ потужності теплової та електричної енергії відображають відповідно осцилограми, показані на рис. 4.11, ж і 4.11, з. При цьому в усіх режимах ВЕУ працює з близьким до максимального значення коефіцієнтом потужності $C_{\text{Pmax}} = 0,351$ (рис. 4.11, е), що свідчить про максимальне використання енергії вітру.

4.2. Оптимальне керування ВЕУ з отриманням теплової енергії методом низькочастотного імпульсного регулювання навантаження СГПМ

У системі періодичного навантаження СГПМ ВР на малих і середніх вітрах постійно працює в режимі динамічних навантажень, що створює додаткові

навантаження на механічну частину ВЕУ. Це зумовило необхідність пошуку іншого, простого в реалізації способу керування навантаженням СГПМ для отримання теплової енергії.

На основі виконаного аналізу можливі способи регулювання навантаження СГПМ можна класифікувати так: 1) широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) на високій частоті, яка значно перевищує частоту напруги генератора; 2) ШІМ на частоті, близькій і кратній до частоти напруги генератора; 3) вмикання-вимикання навантаження з частотою, значно нижчою за частоту напруги генератора.

Перший спосіб, який описано в підрозділі 1.1.3, реалізовано за допомогою транзисторних активних випрямлячів чи діодних випрямлячів з DC-DC перетворювачами. Він забезпечує плавне регулювання навантаження СГПМ, проте така реалізація складна й дорога. Третій спосіб досліджено в попередньому підрозділі й вище перелічено його недоліки.

Другий спосіб, який в електротермії має назву імпульсного низькочастотного керування, на нашу думку, поєднує переваги двох попередніх [29]. За цим методом ТЕНи підключаються до обмотки якоря СГПМ на час, кратний півперіоду чи періоду напруги живлення, причому, для запобігання генерування високочастотних завад, вмикання та вимикання електронних ключів відбувається в моменти переходу відповідної напруги живлення через нуль [39]. За цим методом можна здійснювати ШІМ, частотно-імпульсну модуляцію (ЧІМ), число-імпульсну або комбіновану модуляцію

Особливістю застосування імпульсного низькочастотного керування у ВЕУ, порівняно із застосуванням в електротермії, є змінність як амплітуди, так і частоти напруги живлення в роботі ВЕУ на вітрах різної швидкості. Як відомо, в точці оптимальної потужності частота обертання ВР прямо пропорційна до швидкості вітру. Тому, якщо задатися, для спрощення технічної реалізації, постійною кількістю періодів напруги генератора в періоді керування, зі збільшенням швидкості вітру цей період пропорційно зменшуватиметься. Зумовлене цим зменшення дискретності керування добре узгоджується зі зростанням вимог до швидкодії регулювання, адже, як показано в підрозділі 2.3, зі збільшенням швидкості вітру механічна стала часу ВР знижується. Отже, в подальших дослідженнях ми використаємо модифікований за принципом ШІМ спосіб число-імпульсної модуляції – не зі сталим періодом комутації, а зі сталою кількістю періодів напруги генератора. Це показано на рис. 4.12, де період комутації T охоплює k періодів T_c напруги генератора, а час включення ТЕНів – n періодів цієї напруги.

Вибір оптимальних параметрів системи імпульсного низькочастотного навантаження СГПМ проведемо математичним моделюванням.

Баланс потужності на валу ВР і СГПМ при імпульсному низькочастотному навантаженні визначає наступне рівняння:

$$P_{\rm BP} - \Delta P_{\rm Mex} = P_{\rm eM} \frac{n}{k}.$$
(4.11)

До втрат механічної потужності на тертя в опорах ВР з генератором $\Delta P_{\text{мех}}$ зарахуємо, як і в попередньому випадку, сухе тертя з моментом M_c і в'язке тертя в опорах:

$$\Delta P_{\rm Mex} = \left(M_{\rm c} + b\omega\right)\omega. \tag{4.12}$$



Рис. 4.12. Спосіб модифікованого за принципом ШІМ число-імпульсного низькочастотного регулювання навантаженням генератора ВЕУ

Електромагнітну потужність генератора при його навантаженні на ТЕНи знаходимо як суму активних потужностей в трьох його фазах:

$$P_{\rm eM} = 3I_{\rm e\phi}^2 (R_{\rm T} + R). \tag{4.13}$$

де $I_{e\phi} = I/\sqrt{2}$ – діюче, або ефективне значення струму в фазній обмотці якоря генератора; I – амплітудне значення струму в цій обмотці, яке визначає вираз (4.4).

Підставляючи вирази (1.11), (1.14), (4.12), (4.13) та (4.4) в рівняння (4.11), отримаємо:

$$0,57 \rho_{\pi} A \left(\frac{9,47}{\omega r} V_{B} - 1\right) \exp\left(-\frac{6}{\omega r} V_{B}\right) V_{B}^{3} - (M_{c} + b\omega) \omega = = \frac{3}{2} \cdot \frac{(p\Phi_{m}\omega)^{2} (R + R_{T})}{(R + R_{T})^{2} + (p\omega L)^{2}} \cdot \frac{n}{k}$$
(4.14)

Розв'язок нелінійного рівняння (4.14) чисельним способом дає значення кутової швидкості ВР ω для ВЕУ із заданими параметрами ВР і СГПМ при швидкості вітру $V_{\rm B}$ і значеннях *n* і *k*, що характеризують режим навантаження СГПМ на ТЕНи з опором $R_{\rm T}$. Для дослідження запропонованого способу імпульсного низькочастотного керування навантаженням генератора ВЕУ, в середовищі Mathcad створена програма (Додаток В). У дослідженнях використано параметри ВЕУ потужністю 5 кВт, наведені в табл. 2.2 і 2.3. У програмі організовано зовнішній цикл за швидкістю вітру та внутрішній по значенню *n* для заданого *k*. За отриманими залежностями $\omega(V_{\rm B},n)$ обчислено й представлено графічно сімейство залежностей $C_{\rm P}(V_{\rm B},n)$ для всього робочого діапазону швидкостей вітру (рис. 4.13). Ці залежності дають змогу оцінити можливості імпульсного низькочастотного регулювання навантаження СГПМ при заданих параметрах $R_{\rm T}$ та *k*.

Аналіз отриманих результатів показав, що кількість періодів *k* напруги живлення в періоді комутації впливає лише на дискретність керування. Тому, для зниження похибки керування на малих швидкостях вітру (*n* повинно бути більше

1), вибрано k = 10. Для зручності будемо записувати відношення n/k як δ . Значення опору ТЕНів впливає на діапазон швидкостей вітру, в якому може відбуватися імпульсне низькочастотне регулювання: зі зменшенням опору діапазон дещо розширюється. Однак це призводить до збільшення втрат енергії в обмотці якоря СГПМ. Виходячи з цього, було вибрано як компромісне те ж значення $R_{\rm T} = 1,1$ Ом, яке забезпечує імпульсне низькочастотне регулювання до значення швидкості вітру 9 м/с. При цьому екстремуми залежності $C_{\rm P}(V_{\rm B},n)$ для всього робочого діапазону швидкостей вітру 3…9 м/с потрапляють в діапазон $2 \le n_{\rm opt} \le 10$ (рис. 4.13).



Рис. 4.13. Розрахункові залежності $C_{\rm P}(V_{\rm B},n)$

Для кожної із отриманих кривих, показаних на рис. 4.13, знайдено параметри точок максимумів: *n*_{opt} та кутову швидкість СГПМ. З цих точок сформовано закон оптимального керування ВЕУ шляхом імпульсного низькочастотного навантаження СГПМ, який виявився лінійним:

$$n_{\rm opt} = -2,08 + 1,37\,\omega. \tag{4.15}$$

На основі виразу (4.15) побудовано систему оптимального навантаження генератора ВЕУ. На функціональній схемі ВЕУ (рис. 4.14) обмотка якоря СГПМ

навантажується на три однакових ТЕНи R_н. Для їхнього підключення достатньо використати два електронні ключі К1 і К2 (симістори), що зменшує вартість системи. Для комутації в моменти переходу лінійних напруг U_{AB} і U_{AC} через нуль використана система керування, реалізована на давачах напруги ДН_{АВ} і ДН_{АС}, ланках фіксації переходу напруг через нуль Ф1, Ф2 та логічних елементах І ЛЕ1, ЛЕ2. Ланки Ф1 і Ф2 в момент переходу відповідних напруг через нуль подають одиничні імпульси на другі логічні входи елементів ЛЕ1 і ЛЕ2, які у при наявності сигналу на відкриття ключів на їхніх перших входах відкривають відповідні ключі. За частотою імпульсів ланки Ф1 обчислюється кутова швидкість генератора, а за її значенням і виразом (4.15) – оптимальна кількість періодів навантаження *n*_{opt}. Лічильник 1 рахує кількість періодів напруги й порівнює їх з *k*. У момент, коли значення виходу лічильника 1 перевищить *k*, подається сигнал на R вхід RS-тригера T, який через логічний елемент ЛЕЗ подає сигнал дозволу на поступлення імпульсів на вхід лічильника 2. Вихід останнього, в свою чергу, порівнюється з n_{opt} , яке міняється залежно від частоти обертання генератора. При досягненні лічильником 2 заданого значення nopt він обнуляється, а тригер Т знімає дозвіл поступлення імпульсів на вхід лічильника 2.

На рис. 4.15 приведено комп'ютерну модель ВЕУ з навантаженням СГПМ на ТЕНи, побудовану відповідно до показаної на рис. 4.15 функціональної схеми. Від попередньої, представленої на рис. 4.5, вона відрізняється, в основному, будовою підсистеми керування **Control Subsystem** і наявністю двох електронних ключів IdealSwitch 1-2 для комутації ТЕНів за сигналами переходу через нуль ліійних напруг $U_{\rm ac}$ та $U_{\rm bc}$, які вимірються відповідними вольтметрами.

Підсистема керування **Control Subsystem** (рис. 4.16) побудована відповідно до функціональної схеми, показаної на рис. 4.14. Отримана залежність (4.15) для оптимального керування BEУ записана в блоці Fcn.

У комп'ютерному симулюванні досліджуваної електротеплової ВЕУ в режимі імпульсного низькочастотного навантаження СГПМ (рис. 4.17) тестова швидкість вітру змодельована аналогічно до системи періодичного навантаження трьома інтервалами зі сталими значеннями 3,5, 6,0 і 8,5 м/с (рис. 4.17, а).



Рис. 4.14. Функціональна схема ВЕУ зі системою імпульсного низькочастотного регулювання навантаження СГПМ на ТЕНи



Рис. 4.15. Комп'ютерна модель дослідної електротеплової ВЕУ з імпульсним низькочастотним навантаженням СГПМ на ТЕНи



Рис. 4.16. Комп'ютерна модель підсистеми керування **Control Subsystem** для автоматичного імпульсного низькочастотного регулювання навантаження СГПМ на ТЕНи в дослідній електротепловій ВЕУ

Зростання частоти обертання СГПМ призводить до зменшення періоду лічильника 1, що охоплює k =10 періодів напруги генератора. Значення n зі збільшенням кутової швидкості генератора поступово зростає від 3 до 9, збільшуючи щілинність імпульсного керування δ . Це призводить до збільшення як амплітуди електромагнітного моменту навантаження генератора, так і його щілинності (рис. 4.17, б), а отже, – середнього значення цього моменту. При цьому кутова швидкість ВР з генератором має лише незначні коливання, як показує рис. 4.17, в. Відповідно коливається і швидкохідність ВР (рис. 4.17, г), а значення коефіцієнта потужності в усталеному режимі досягає максимального рівня $C_{\rm Pmax} = 0,351$ (рис. 4.17, д). При цьому отримувана теплова потужність теж має імпульсний характер (рис. 4.17, е). На рис. 4.17, є приведено осцилограму струмів якоря СГПМ.





Рис. 4.17. Часові залежності основних координат досліджуваної електротеплової ВЕУ в режимі імпульсного низькочастотного керування навантаженням СГПМ

На рис. 4.18 показані осцилограми фрагменту тривалістю 1 с з попереднього тестового дослідження роботи системи імпульсного низькочастотного керування, який показує, як працюють лічильники тривалості циклу k (рис. 4.18, а), тривалості підключення ТЕНів n (рис. 4.18, б) і сигналу ШІМ зі щілинністю δ (рис. 4.18, в). З осцилограми струмів якоря (рис. 4.18, г) видно, що комутація струмів відбувається при переході їхніх значень через нуль.

Розроблена система імпульсного низькочастотного регулювання навантаження СГПМ може замінити систему періодичного навантаження ВР, розроблену в підрозділі 4.1. При цьому результати роботи електротеплової ВЕУ будуть характеризуватися кривими потужності, практично такими ж, як показані на рис. 4.10.



Рис. 4.18. Осцилограми фрагменту роботи системи імпульсного низькочастотного керування навантаженням СГПМ

4.3. Система оптимального керування когенераційною автономною ВЕУ

Як показали дослідження, проведені в підрозділах 4.1 і 4.2, розроблені електротеплові ВЕУ мають дещо обмежені можливості щодо генерування обох видів енергії на вітрах різної швидкості. Це пов'язано з максимальним спрощенням конструкцій цих ВЕУ для мінімізації їхньої вартості та скорочення терміну окупності. Цим же пояснюється відсутність можливості обмеження їхньої потужності при роботі на вітрах з високою швидкістю.

Окрім цих дешевих варіантів електротеплових ВЕУ, пропонуємо теж принципово іншу концепцію, дорожчу, проте позбавлену вказаних недоліків і з новими якостями – когенераційну автономну ВЕУ з ВВО [23].

4.3.1. Розроблення нового об'єкта малопотужної вітроенергетики – когенераційної автономної ВЕУ з ВВО. Принцип побудови когенераційної автономної ВЕУ вВО пояснює рис. 4.19. На валу 2 ВР 1 встановлено два генератори: традиційний СГПМ 3 та тепловий генератор 4 спеціальної конструкції. Відбір електричної енергії від СГПМ здійснюється через електронний перетворювач напруги 5 (АВН) до АБ 6, до якої підключені електричні споживачі. Відбір теплової енергії від теплогенератора 4 відбувається шляхом періодичного прокачування рідкого теплоносія за допомогою помпи 8 до теплового акумулятора 9 (бойлера). Автоматичне регулювання роботи СГПМ здійснює перетворювач напруги 5, теплового генератора – електронний регулятор його збудження 7.

Найдоцільніше перетворити енергію обертового руху в теплоту через посередництво електромагнітного поля. У запропонованому нами [23] обертовому електромагнітному перетворювачі механічної енергії в теплоту (ЕПМЕТ) (рис. 4.20) нерухомий індуктор 1 має розміщені по колу стальні зубці 2, на які одягнуті котушки 3. Для збільшення площі перерізу магнітопроводу в робочому проміжку зубці обладнані стальними наконечниками 4. На мінімальній віддалі від наконечників розміщено стальний диск 5, зв'язаний з валом 6 обертання ВР. На

поверхню диска 5 нанесено тонкий шар 7 з неферомагнітного матеріалу з високою електропровідністю (мідь, алюміній). Якщо котушки з'єднати послідовно, вивернувши їхні кінці через одну, то при проходженні по них постійного електричного струму через тіло диску буде замикатися постійний магнітний потік з перемінною по колу полярністю. При обертанні диску цей потік у кожній точці тіла диску вже буде змінним, що супроводжуватиметься генеруванням в диску ЕРС та, відповідно, вихрових струмів. Особливо значними вони будуть у неферомагнітному шарі диску. Джоулева теплота від вихрових струмів є позитивним ефектом роботи ЕПМЕТ. Для її використання диск повинен мати добрий тепловий контакт з рідким теплоносієм 8, що відводитиме теплоту до бойлера. ЕПМЕТ поміщено в кожух 9, який добре теплоізольований.



Рис. 4.19. Ескіз конструкції когенераційної автономної ВЕУз ВВО

Порівняно з електротепловою ВЕУ з лише електричним генератором, когенераційна ВЕУ, обладнана двома генераторами – електричним і тепловим, має ширші можливості:

- завдяки практично необмеженій ємності теплового акумулятора вся доступна ВР механічна енергія вітру корисно використовується;


Рис. 4.20. Ескіз конструкції електромагнітного теплового генератора – ЕПМЕТ



б)

a)



B)

Рис. 4.21. Основні елементи конструкції макетного взірця ЕПМЕТ: а) індуктор з 20 полюсами; б) ротор з мідним поверхневим шаром; в) макетний

взірець у зборі

- максимально використовується енергія вітру при його швидкостях, що перевищують номінальне значення, яке у ВЕУ з одним електричним генератором обмежується його потужністю;

- можна суттєво зменшити (аж до повного виключення) встановлену ємність електрохімічних акумуляторних батарей, нагромаджуючи зайву вітрову енергію у вигляді теплоти.

Величина генерованого теплового потоку залежатиме від геометрії конструкції ЕПМЕТ, намагнічуючої сили індуктора, яку можна регулювати зміною струму збудження, частоти обертання диска та його структури.

Проектування та оптимізація параметрів ЕПМЕТ здійснювалися із застосуванням комп'ютерного середовища ANSYS для моделювання полів за методом скінченних елементів (в даному випадку магнітного і теплового) [123]. За розробленою методикою проведено оптимізаційні розрахунки для низки типорозмірів ЕПМЕТ з номінальними значеннями теплової потужності 0,5, 1, 2, 5 і 10 кВт для когенераційних малопотужних VAWT.

Відповідно до результатів розрахунків спроектовано та виготовлено за участю автора ЕПМЕТ, індуктор якого складається з 20 зубців з котушками. Він розрахований на номінальну теплову потужність 500 Вт при частоті обертання 250 об/хв і струмі збудження 2 А й напрузі обмотки збудження 12 В. При цьому на збудження затрачається 25 Вт електричної енергії, тобто ККД ЕПМЕТ в номінальному режимі не нижчий за 0,95. Зовнішній діаметр ярма індуктора рівний 340 мм, висота його котушки 42 мм. Основні елементи конструкції макетного взірця показано на рис. 4.21 [41].

На рис. 4.22 показано результати розрахунку впливу товщини мідного шару, нанесеного на поверхні стального диска товщиною 6 мм при його обертанні з номінальною частотою [123]. Як видно, основна теплота виділяється в тонкому мідному шарі, причому достатньо його товщини 0,3-0,4 мм. Без цього шару в самому стальному диску при тих же параметрах генерувалося б лише 130 Вт теплового потоку.



Рис. 4.22. Залежності втрат потужності в шарах обертового диска ЕПМЕТ від товщини мідного шару на поверхні стального диска

ЕПМЕТ разом з макетним взірцем електричного генератора – двоякірного синхронного генератора з постійними магнітами потужністю 300 Вт – виконано у блока генераторів. Останній (позиція вигляді одного 1) на створеному експериментальному стенді (рис. 4.23) приводить в рух двигун постійного струму 2 черв'ячний редуктор 3. Ha через цьому стенді проведено цикл експериментальних досліджень роботи ЕПМЕТ на різних частотах обертання з різними струмами збудження [41]. Генерована в роторі ЕПМЕТ теплова потужність розрахована як різниця між потужністю, споживаною привідним двигуном, і потужністю його електричних втрат, втрат неробочого ходу та механічних втрат стенду. Результати досліджень (рис. 4.24) підтвердили ЕПМЕТ працездатність й узгодження його робочих характеристик 3 розрахунковими проектними.

4.3.2. Розроблення системи керування роботою ЕПМЕТ. Автоматичне керування роботою ЕПМЕТ здійснюється регулюванням його струму збудження за допомогою малопотужного напівпровідникового перетворювача постійної напруги (ППН) понижувального типу, який живиться від АБ, що служить нагромаджувачем електроенергії у ВЕУ.



Рис. 4.23. Експериментальний стенд для дослідження макетного взірця блока генераторів когенераційної ВЕУ з ВВО:

1 – макетний взірець блока генераторів; 2 – привідний двигун; 3 – редуктор



Рис. 4.24. Залежності теплового потоку в роторі макетного взірця ЕПМЕТ $P_{\rm T}$ від його частоти обертання *n* за різних значень струму збудження $I_{\rm f}$

Інтегрування локальної системи керування процесом генерування теплової енергії у базову структуру автономної електричної ВЕУ з ВВО (рис. 2.1), показано на функціональній схемі когенераційної автономної ВЕУ з ВВО (рис. 4.25).



Рис. 4.25. Функціональна схема системи когенераційної автономної ВЕУ з ВВО

Для здійснення функцій автоматичного керування роботою ВЕУ розроблено дворівневу систему керування.

На нижньому рівні в другій зоні керування (рис. 1.10) здійснюється оптимальне навантаження ВР, за якого від вітру відбирається максимальна

потужність, а в третій – обмеження потужності ВЕУ. Це можна забезпечити як за допомогою СГПМ, так і ЕПМЕТ завдяки системі керування через АВН і ППН відповідно. Автоматичне керуванню роботою ВЕУ у вказаних режимах при генеруванні електричної енергії детально розглянуте в розділі 3. Автоматичне керування при генеруванні теплової енергії можна забезпечити подібним чином.

На верхньому рівні працює система енергетичного менеджменту, здійснюючи автоматичне керування енергопотоками відповідно до розробленого алгоритму, спрямованого на максимально ефективне використання енергії вітру. До системи керування верхнього рівня подаються сигнали від енкодера Е про кут положення ротора, від давачів струмів генерування електроенергії – ДС1 та її споживання – ДС2, а також від давачів температури в резервуарі ЕПМЕТ – ДТ1 та в бойлері – ДТ2, за різницею показів яких подається сигнал на вмикання та вимикання помпи, що перекачує теплоносій у бойлер.

Алгоритм керування, за яким працює дворівнева система керування, може бути реалізований на мікроконтролері, до якого підключені, крім вказаних вище, і необхідні давачі для керування на нижньому рівні – три давачі струмів СГПМ – ДСЗ для керування АВН і давач струму обмотки збудження ЕПМЕТ – ДС4.

У результаті проведеного математичного моделювання фізичних процесів різної природи, що мають місце в ЕПМЕТ (Додаток Г), створено математичну модель об'єкта регулювання у вигляді отримуваної на виході ЕПМЕТ теплової потужності (теплового потоку) $P_{\rm T}$ і відповідного механічного моменту теплогенератора $M_{\rm TT}$ за конкретної кутової швидкості ω і напруги збудження $U_{\rm f}$ (виділена на рис. 4.26 пунктиром частина – ЕПМЕТ). Керування напругою збудження реалізовано на базі транзисторного ППН з ШІМ-регулюванням.

Для ЕПМЕТ як об'єкта регулювання необхідно побудувати САК з двома різними САР, які доцільно застосовувати в різних режимах роботи автономної когенераційної ВЕУ:

1. САР за відхиленням заданої теплової потужності. Остання може мати різні варіанти формування. Так, у режимі неповного навантаження ВЕУ задана теплова потужність повинна забезпечувати таке додаткове механічне навантаження на ВР, щоб його робота відбувалася в ТМВП, тоді як потужність генерованої електричної енергії є обмеженою через невелике споживання та відсутність АБ чи їхню повну зарядженість. У режимі обмеження потужності на великих вітрах задана теплова потужність може забезпечувати stall чи feathering-регулювання, аналогічно до забезпечення цього режиму каналом генерування електроенергії.



Рис. 4.26. Структурна схема системи керування ЕПМЕТ

2. САР за збуренням кутової швидкості ВР, що працює за принципом ОТС. забезпечуватиме оптимальне навантаження ВЕУ лише Вона 3a каналом генерування теплоти, підсистема генерування коли електричної енергії відключена через відсутність електроспоживання чи пріоритет генерування теплової енергії.

У першому випадку перемикач режимів роботи S (рис. 4.26) перебуває у верхньому положенні. САР має структуру системи підпорядкованого регулювання з внутрішнім контуром регулювання струму збудження ЕПМЕТ і регулятором струму збудження РСЗ та зовнішнім контуром регулювання теплової потужності з регулятором потужності РП. У режимі обмеження потужності ВЕУ задана потужність $P_{\rm r}^*$ обмежується на максимальному значенні, а теплова потужність ЕПМЕТ при зростанні кутової швидкості стабілізується за рахунок зниження струму збудження. Тобто автоматично забезпечується режим feathering-регулювання.

У другому випадку перемикач режимів роботи S перебуває в нижньому положенні. САР має комбіновану структуру: внутрішній контур регулювання струму збудження ЕПМЕТ за відхиленням залишається без змін, тоді як зовнішній контур регулюється за збуренням кутової швидкості ВР. Для цього виміряна енкодером кутова швидкість генератора подається на вхід блока OΠ, оптимального регулювання В якому реалізується регулювальна характеристика конкретного ЕПМЕТ, яку приводить у рух конкретний ВР, – функціональна залежність оптимального значення струму збудження ЕПМЕТ від його кутової швидкості $I_{\rm f}^*(\omega)$. За перевищення кутовою швидкістю номінального значення перемикач S встановлюється у верхнє положення, де забезпечується режим обмеження потужності ВЕУ.

4.3.3. Алгоритм енергопотоками когенераційній керування В автономній ВЕУ. Для керування на верхньому рівні розроблено алгоритм керування потоками електричної та теплової енергії за стохастичного характеру як генерування, так і споживання енергії. Пріоритетним є генерування електроенергії як енергії значно вищої якості та пряма передача її споживачеві, що забезпечуватиме її найменші втрати. У випадку надлишкової електричної потужності зайва електрична енергія нагромаджується в АБ. За повного ступеня зарядженості останньої надлишкова отримувана ВР від вітру механічна енергія перетворюється в ЕПМЕТ у теплоту. В залежності від потреб споживача когенераційна ВЕУ може генерувати тільки електричну, тільки теплову або обидва види енергії. Усі ці режими забезпечують екстремальне керування та відбір максимальної потужності від вітру за змінної його швидкості в зоні 2 роботи ВЕУ та обмеження її потужності при роботі в зоні 3.

Основним елементом у системі керування є АВН, який повинен забезпечити максимальний відбір потужності вітру за різних його швидкостей, ефективний заряд і розряд АБ, роботу СГПМ з максимальною енергетичною ефективністю.

Узагальнений алгоритм керування енергопотоками на верхньому рівні керування когенераційною автономною ВЕУ показано на рис. 4.27.

У блоці 1 здійснюється вибір режиму роботи ВЕУ: «автоматичний» чи «ручний». При «автоматичному» режимі в блоці 2 визначається струм АБ $I_{AБ}$ як різниця між струмом на виході АВН I_{ABH} і струмом споживання I_{cn} . У блоці 3 порівнюється струм на виході ВЕУ зі струмом споживання. При умові $I_{ABH} > I_{cn}$, споживач повністю живитиметься від СГПМ (блок 4).

На АБ ставимо обмеження їхнього ступеня зарядженості SOC (State Of Charge). Наприклад, для свинцево-кислотних гелевих АБ, які переважно застосовують у BEV, допустимий діапазон роботи АБ перебуває в межах SOC = 50...100%. Якщо SOC < 100% (блок 5) – надлишковий струм I_{ABH} - I_{cn} буде йти на зарядження АБ (блок 6). Якщо зарядний струм АБ більший за максимальний $I_{AB.3ap}$ $\ge I_{Ab.3ap.max}$ (блок 7), генерована електрична потужність $P_{r.e.n}$ знижується до такого рівня, щоб $I_{Ab.3ap} = I_{Ab.3ap.max}$ (блок 8). Решта потужності ВР у цьому випадку повинен взяти на себе ЕПМЕТ, який виконуватиме також функцію автоматичного регулювання оптимального навантаження BEV – робота в ТМВП (блок 10). Якщо AБ зарядиться повністю (SOC =100%), генерована електрична потужність $P_{r.e.n}$ знижується до такого рівня, щоб $I_{ABH} = I_{cn}$ (блок 9). При цьому струм заряджання AБ рівним нулеві, і AБ не перезаряджатиметься. Решту потужності BP знову ж візьме на себе ЕПМЕТ (блок 10).

Якщо генерована електрична потужність є меншою за споживану ($I_{ABH} < I_{cn}$, блок 3), вся електрична потужність від АВН йде до споживача, а решту необхідної споживачу потужності забезпечує АБ (блок 11). При цьому автоматичне регулювання навантаження СГПМ здійснюється в ТМВП.



Рис. 4.27. Блок-схема алгоритму керування енергопотоками в когенераційній автономній ВЕУ

У таких режимах роботи можливе перевантаження АБ великими струмами, а також перерозряджання АБ нижче допустимого мінімального рівня ступеня зарядженості SOC_{min}, чому система керування має запобігти.

Якщо АБ ще не розряджена до мінімального рівня SOC > SOC_{тіп} (блок 12), система контролює значення розрядного струму, порівнюючи його з максимально допустимим $I_{AE,po3,max}$ (блок 13). У разі його не перевищення розрядний струм порівнюється у блоці 14 з рівнем 10-секундного перевантаження АБ $I_{AE,po3,nep}$ (блок 14). При перевищенні цього рівня до споживача надходить звуковий сигнал і візуальна рекомендація на вимкнення некритичних споживачів (блок 15) і починається відлік заданого часу на вимкнення (блок 16). По закінченню визначеного часу, при наявності перевантаження, система відмикає все електричне споживання (блок 17). Та ж реакція настане у випадку $I_{AE,po3} \ge I_{AE,po3,max}$ (блок 13). В усіх цих випадках подальша робота ВЕУ здійснюватиметься за лівою частиною алгоритму (блоки 4-10): буде максимально заряджатися AБ, а за перевищення зарядним струмом допустимого рівня підключатиметься ЕПМЕТ. Робота ВЕУ завжди буде здійснюватися в ТМВП.

Отже, за паралельної роботи обох каналів генерування енергії оптимальне регулювання навантаження ВР у зоні 2 здійснюється ППН, оскільки ЕПМЕТ забирає на себе надлишкову механічну енергію, тоді як АВН або забезпечує необхідну потужність електроенергії споживачеві, або обмежує на максимально можливому рівні струм заряджання АБ.

При «ручному» режимі роботи СГПМ відключається, вся потужність ВЕУ перетворюється в теплоту, при цьому автоматичне регулювання ЕПМЕТ здійснюється в ТМВП (блок 18).

Режими обмеження потужності ВЕУ на великих вітрах реалізуються в підсистемах нижнього рівня як в каналі генерування електроенергії (блок 11), так і в каналі генерування теплової енергії (блоки 10 і 18).

4.3.4. Комп'ютерне моделювання роботи когенераційної автономної ВЕУ. Для дослідження було взято ВЕУ з ВВО номінальною потужністю 5 кВт,

що забезпечується при швидкості вітру 8 м/с. Параметри ВР для такої ВЕУ, після відповідних розрахунків, було вибрано такими: $A = 50,25 \text{ м}^2$, r = 3,54 м, $\omega_{\text{H}} = 8,3$ рад/с, характеристику $C_{\text{P}}(\lambda)$ описує вираз (1.14), $M_{\text{c}} = 25 \text{ H} \cdot \text{м}$, $b = 1,2 \text{ H} \cdot \text{м} \cdot \text{c}$. Робочі характеристики ЕПМЕТ потужністю 5 кВт сформовано аналогічними за характером до отриманих теоретично (рис. 4.24) та представлено на рис. 4.28. Акумуляторні батареї вибрано свинцево-кислотні з робочою напругою 220 В (18 батарей, з'єднаних послідовно). Розрахована ємність батарей становить 60 А·год, що забезпечує середній одноденний запас електроенергії для невеликого приватного котеджу. Значення струму збудження ЕПМЕТ у номінальному режимі ($U_{\text{f.H}} = 220 \text{ B}$) вибрано таким, що втрати енергії на збудження становлять 6,6% від генерованої теплової енергії (хоча енергія збудження ЕПМЕТ не є втраченою, оскільки спричиняє додаткове нагрівання резервуара).



Рис. 4.28. Залежності теплового потоку $P_{\rm T}$ у роторі дослідного ЕПМЕТ номінальною потужністю 5 кВт від його кутової швидкості ω за різних значень струму збудження $I_{\rm f}$

Розроблена в середовищі MATLAB/Simulink загальна комп'ютерна модель когенераційної ВЕУ представлена на рис. 4.29.



Рис. 4.29. Загальна комп'ютерна модель когенераційної автономної ВЕУ

Основні підсистемами когенераційної ВЕУ є такі:

- Turbulence Wind Subsystem (підсистема турбулентного вітропотоку);
- Wind Turbine Subsystem (підсистема ВР);
- Electric Subsystem (підсистема векторного керування СГПМ);
- Hit Generator Subsystem (підсистема ЕПМЕТ);
- Hit Container Subsystem (підсистема передачі теплоти до бойлера);

• Energy Flow Control Subsystem (підсистема керування енергопотоками ВЕУ на верхньому рівні);

• Current Consuption Subsystem (підсистема споживача електричної енергії).

Комп'ютерні моделі перших трьох підсистем, що представляють ВР і канал генерування електричної енергії, такі ж, як у розділах 2 і 3. Решта підсистем розроблено відповідно до математичної моделі ЕПМЕТ (Додаток Д), системи керування його роботою (підрозділ 4.3.2) й алгоритму керування енергопотоками в когенераційній автономній ВЕУ (підрозділ 4.3.3).

Комп'ютерна модель теплового генератора (ЕПМЕТ з DC – DC регулятором збудження) (рис. 4.30) складається з двоконтурної системи підпорядкованого регулювання з внутрішнім контуром регулювання струму збудження, який містить регулятор струму збудження CR, DC-DC перетворювач напруги, електромагнітну частину ЕПМЕТ зі сталою часу обмотки збудження 0,5 с й активним опором $R_f = 147$ ом, та зовнішнім контуром регулювання теплової потужності з регулятором RP.

Через вхід оп електронний ключ Switch1 вмикає завдання струму збудження ЕПМЕТ. Останнє, у свою чергу, перемикає електронний ключ Switch2. При появі сигналу ручного керування manual завдання струму збудження ЕПМЕТ подається з виходу блока Look-Up Table1, у якому таблично задана регулювальна характеристика ЕПМЕТ (рис. 4.31), отримана відповідно до кривої оптимального керування ВЕУ за принципом ОРС (1.17) – Рорт на рис. 4.28:

$$P_{\rm BP\,max} = k_{\rm M}\omega^3 - M_{\rm c}\omega - b\omega^2.$$
(4.16)

Це забезпечить оптимальне регулювання роботи самого ЕПМЕТ за збуренням вимірюваної енкодером кутової швидкості СГПМ.



Рис. 4.30. Комп'ютерна модель ЕПМЕТ зі системою регулювання збудження (підсистема **Hit Generator Subsystem**)



Рис. 4.31. Регульована характеристика збудження ЕПМЕТ для оптимального

керування ВЕУ

За автоматичного керування ключ Switch2 подає на вхід контуру регулювання струму завдання з регулятора потужності. На вході останнього порівнюються сигнали завдання теплової потужності P*h і значення останньої Pt, отримане з моделі, що реалізована в блоці Look-Up Table (n-D)3 на основі залежностей генерованої теплової потужності від кутової швидкості при різних струмах збудження (рис. 4.28). На виході підсистеми отримуються значення генерованого теплового потоку (теплової потужності) Pt і механічного моменту навантаження M, що створюється при цьому.

У підсистемі передачі теплоти до бойлера (рис. 4.32) реалізовано принцип нагрівання та охолодження теплоносія на основі виразів (Г.4) – (Г.7) відповідно до прийнятого алгоритму двопозиційного керування температурою теплоносія в резервуарі.



Рис. 4.32. Комп'ютерна модель системи теплопередачі до бойлера (підсистема Hit Container Subsystem)

Вибравши помпу з продуктивністю Q = 40 л/хв і прийнявши, що маса ротора ЕПМЕТ рівна $m_p = 18$ кг, за виразами (Г.6) і (Г.17) отримано $C_{\Sigma} = 103,0$ кДж/К та об'єм резервуара ЕПМЕТ $V_{\text{т.p}} = 22,6$ л. Значення сталої часу відбору теплоти від ЕПМЕТ, відповідно до (Г.10), становить $T_{\text{в.т}} = 37$ с. Температури перегріву для ввімкнення та вимкнення помпи прийнято відповідно $\Delta \theta_{\rm on} = 15^{\circ}$ С і $\Delta \theta_{\rm off} = 5^{\circ}$ С, а температуру теплоносія в бойлері – 35°С. Інші параметри моделі мають такі значення: $k_{\rm r-o} = 0,725$ BT/K, $c_{\rm r} \rho_{\rm r} Q = 2788$ BT/K.

До підсистеми керування енергопотоками Energy Flow Control Subsystem (системи керування верхнього рівня) поступають сигнали про значення таких змінних від відповідних давачів (рис. 4.29): кутової швидкості СГПМ w, струмів ABH I_AR, AБ I_AB і споживання I_load, ступеня зарядженості AБ SOC. Вихідними сигналами підсистеми ϵ : команди на ввімкнення збудження ЕПМЕТ on_h і відімкнення споживання електроенергії off_e, завдання на амплітуду фазного струму СГПМ I*q (електричне навантаження) та завдання на потужність ЕПМЕТ P_h (теплове навантаження), сигнал ручного режиму на ввімкнення виключно теплового навантаження manual.

У комп'ютерній моделі підсистеми **Energy Flow Control Subsystem** (рис. 4.33) реалізовано розроблений алгоритм керування енергопотоками (рис. 4.27), який виконує такі головні завдання керування когенераційною ВЕУ:

• пріоритетне генерування електроенергії й забезпечення нею споживача та заряджання АБ;

• оптимальне навантаження BP і отримання максимально можливої потужності BP від вітру;

• енергетичний менеджмент АБ – контроль ступеня зарядженості SOC і запобігання перезаряджання та перерозряджання.

У верхній частині моделі (рис. 4.33) за сигналом кутової швидкості генератора w, відповідно до виразів (2.18) і (2.16), визначається оптимальне значення моменту навантаження BP, а після віднімання від останнього моментів навантажень від сухого Mc і в'язкого kw·w тертя – завдання на електромагнітний момент СГПМ, з якого визначається завдання на відповідну амплітуду його фаного струму якоря I*q.opt. Останнє через перемикачі Switch i Switch1 поступає на вихід підсистеми й далі – до підсистеми СГПМ з векторним керуванням.



Рис. 4.33. Комп'ютерна модель системи керування енергопотоками (Energy Flow Control Subsystem)

Перемикач Switch відмикає вказане завдання на струм генератора за одним з двох сигналів, сформованих на вході логічного елемента OR: 1) при досягненні SOC = 100%, що фіксується гістерезисним блоком Relay; 2) при перевищенні зарядним струмом АБ максимально заданого значення I_AB > I*AB_z.max, що фіксується блоком порівняння Relational Operator1. В обох випадках повинно зменшуватися генерування електроенергії порівняно з потужністю оптимального навантаження BP, і решту навантаження повинен брати на себе ЕПМЕТ. Для цього через логічний блок OR2 формується логічний сигнал on_h на вмикання теплового навантаження, а завдання на струм якоря СГПМ формується шляхом автоматичного регулювання струму АВН в контурі з регулятором струму CR.

У випадку 1 струм АВН підтримується рівним струму споживання I_load, і тому струм заряджання АБ буде нульовим, що виключить перезаряд АБ. У випадку 2 струм АВН підтримується рівним струму споживання плюс максимальний зарядний струм АБ I*AB_z.max, який додається до I_load через ввімкнення ключа Switch2. Оскільки в обох випадках електричне навантаження знижується порівняно з оптимальним, різниця моментів, оптимального для ВР за даної його кутової швидкості та електромагнітного, створюваного електричним навантаженням, після множення на кутову швидкість подається на вихід підсистеми як сигнал на завдання потужності ЕПМЕТ Р*h. Блок регульованого обмеження Saturation Dynamic на виході регулятора струму CR максимальне значення струму якоря СГПМ обмежує на рівні оптимального для конкретної забезпечує коректний кутової швидкості ВР, ЩО перехід ДО режиму розряджання АБ.

У випадку розрядження АБ до мінімального рівня, SOC < SOCmin, що фіксує гістерезисний блок Relay 1, керування змінюється лише, якщо струм споживання I_load перевищуватиме струм генерування – вихідний струм АВН I_AB. Тоді після спрацювання логічного блока AND1, для захисту АБ від перерозряджання, формується вихідний сигнал off_е на відімкнення електричного навантаження. Для споживача це буде сигналом про те, що треба відімкнути

некритичні навантаження для зменшення струму споживання I_load. Одночасно через логічний блок OR2 формується логічний сигнал on_h на вмикання теплового навантаження – збудження ЕПМЕТ.

Для захисту АБ від занадто великих струмів розряджання задано два рівні цих струмів: нижнє значення I*AB_r.max, яке призводить до спрацювання логіки, коли розрядний струм АБ I АВ перевищує це значення протягом заданого часу; верхнє значення I*AB_r.max1, яке призводить до спрацювання логіки відразу за перевищення розрядним струмом АБ цього значення. У будь-якому випадку після фіксації його логічним блоком OR1 спрацьовує тригер, що міститься в підсистемі Subsystem off-е, який формує постійний сигнал на відімкнення електричного навантаження (блок OR3) і ввімкнення теплового (блок OR2). Наступне ввімкнення електричного навантаження лише після ручного можливе перемикання вказаного тригера кнопкою у підсистемі Subsystem off-е.

За допомогою ручного перемикача Manual Switch здійснюється перемикання роботи ВЕУ лише на генерування теплоти. Для цього електронний ключ Switch1 задає нульове значення струмів якоря СГПМ, а на вихід manual підсистеми керування подається логічна одиниця, яка подає сигнал до підсистеми теплового генератора на його ввімкнення й автоматичне регулювання його роботи в точці максимуму потужності ВЕУ.

4.3.5. Результати комп'ютерного симулювання роботи когенераційної автономної ВЕУ. Проведено три серії комп'ютерних досліджень роботи ВЕУ на турбулентному вітрі, в яких ми моделювали мале та велике споживання електроенергії за різних рівнів ступеня зарядженості свинцево-кислотних АБ:

- 1) 50% < SOC < 100% робочий діапазон АБ;
- 2) SOC близький до 100% повне заряджання АБ;
- 3) SOC близький до 50% повне розряджання АБ.

Нижче наведено результати для випадку 1, адля випадків 2 і 3 – в Додатку Д. Вони дають змогу пересвідчитися в коректності роботи розробленої системи керування когенераційною автономною ВЕУ.

Осцилограми основних координат і показників роботи ВЕУ в робочому діапазоні зарядженості АБ показано на рис. 4.34 - 4.39. Симулювання тривало 50 с. На рис. 4.34 приведено осцилограми швидкості турбулентного вітру зі середнім значенням – 8,0 м/с і відповідної кутової швидкості ВР.



Рис. 4.34. Часові залежності швидкості вітру Vw (1) і кутової швидкості ВР w (2)

З часових залежностей струмів у ланці постійного струму з робочою напругою 220 В (рис. 4.35) видно, що їхня сума рівна 0. Потужність споживання змінювалася кожних 11 с, причому спочатку значення струму були малі – 1 і 2 А, а потім великі – 40, 45 і 100 А. На інтервалах часу 3...5 с і 11...22 с, коли струм споживання малий, а швидкість вітру значна, струм заряджання АБ досягає встановленого допустимого значення 19 А, і тому система керування обмежує цей струм зниженням струму на виході АВН на цьому ж рівні (рис. 4.35 і 4.36, а). Решта потужності ВР у ці моменти часу передається до ЕПМЕТ, про що свідчить осцилограма на рис. 4.36, г. При великій потужності електроспоживання (22...44 с) струм споживання постачається як від АВН, так і від АБ. В інтервалі часу 34,5...44 с струм розряджання АБ є більшим за встановлене значення 10секундного перевантаження 30 А, про що сигналізує сигнал логічної «1» на рис. 4.36, б. Проте система продовжує генерування та постачання електроенергії аж до моменту часу 44 с, коли струм споживання зростає до 100 A і перевищує встановлене допустиме миттєве значення 60 A. У цей момент система відмикає електроспоживання (рис. 4.36, в), струм заряджання АБ обмежується на допустимому рівні 19 A, а решта навантаження передається до ЕПМЕТ (рис. 4.36, г).



Рис. 4.35. Часові залежності струмів: І AR – на виході ABH (1), І load – споживання (2), І AB – акумуляторної батареї (3)



Рис. 4.36. Часові залежності логічних сигналів про стан системи: а) перезаряд АБ, б) перерозряд АБ, в) ввімкнення електричного споживання, г) ввімкнення теплового навантаження

Ступінь зарядженості АБ за час експерименту змінюється, як показано на рис. 4.37, який відображає інтервали малого, великого та відімкненого електроспоживання.



Рис. 4.37. Часова залежність ступеня зарядженості АБ SOC

З рис. 4.38 видно, що ЕПМЕТ достатньо точно відпрацьовує задану системою керування потужність теплового навантаження.



Рис. 4.38. Часові залежності заданої Pzt і забезпеченої ЕПМЕТ Pt теплової потужності

Оптимальне навантаження ВР за тестовий період, як за допомогою самого СГПМ чи самого ЕПМЕТ, так і за їхньої спільної роботи відображають осцилограми на рис. 4.39. Як видно з останніх, $C_{\rm P}$ практично рівне своєму максимальному значенню 0,351, а λ коливається біля свого оптимального значення 3,675. Це свідчить про коректну роботу систем керування як на нижньому рівні, так і на верхньому в робочому діапазоні зарядженості АБ.



Рис. 4.39. Часові залежності коефіцієнта відбору ВР потужності від вітру (а) та швидкохідності ВР (б)

Результати комп'ютерного симулювання, які показують працездатність розробленого алгоритму керування роботою когенераційної автономної ВЕУ в режимах повного заряджання та повного розряджання АБ, приведено у Додатку Г.

4.4. Висновки до розділу

1. Запропонований спосіб і розроблена система періодичного навантаження СГПМ на ТЕНи дали змогу реалізувати просту та дешеву систему квазіоптимального керування електротепловою ВЕУ, яка має можливість ефективно генерувати електричну енергію на середніх і великих вітрах, теплову енергію – у всьому робочому діапазоні швидкостей вітру та обидва види енергії одночасно – на великих вітрах.

2. Система бездавачевого низькочастотного імпульсного керування, яку можна легко реалізувати на дискретних елементах чи найдешевших логічних мікроконтролерах, дає змогу забезпечувати оптимальне навантаженням СГПМ.

3. Запропоновано когенераційну автономну ВЕУ з ВВО, яка генерує й акумулює отриману від вітру механічну енергію як у вигляді електричної, так і теплової енергії. До складу такої ВЕУ, крім електричного СГПМ, входить спеціальний тепловий генератор – ЕПМЕТ, який перетворює механічну енергію ВР безпосередньо в теплоту за посередництва електромагнітного поля. Завдяки когенерації в усіх режимах роботи ВЕУ всю доступну енергію вітру корисно використовує споживач, а також вона акумулюється у вигляді електроенергії в АБ та у вигляді теплоти в бойлері. Побудовано математичну модель, що описує механічні, електромагнітні та теплові процеси, які відбуваються при роботі ЕПМЕТ.

4. Відповідно до функціональної схеми автономної когенераційної ВЕУ розроблено алгоритм керування енергопотоками вищого рівня, який керує оптимальним електричним навантаженням СГПМ через АВН або оптимальною потужністю теплового потоку ЕПМЕТ регулюванням його струму збудження за допомогою ППН. Алгоритм передбачає всі можливі стани системи як щодо потужності генерування та споживання електроенергії, так і щодо ступеня зарядженості АБ.

5. Аналіз результатів комп'ютерного симулювання дає змогу стверджувати, що при всіх можливих режимах роботи система керування забезпечує максимальний відбір потужності від вітру і максимальне використання цієї потужності для генерування електроенергії, як безпосередньо для споживання, так і для акумулювання в АБ. Алгоритм також передбачає функцію енергетичного менеджменту АБ: моніторинг ступеню їхньої зарядженості, запобігання як перерозряджанню, так і перезаряджанню, а також обмеження струму заряджання та дворівневий захист від надструмів розряджання.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИМИ ВЕУ

5.1. Експериментальний стенд для дослідження роботи автономних електротеплових ВЕУ

Для циклу експериментальних досліджень розроблених систем керування електротепловими ВЕУ, описаних у розділі 4, стенд з електроприводом блока генераторів (рис. 4.23) був удосконалений: привідний двигун постійного струму замінили короткозамкнутим асинхронним двигуном (АД) типу АОД2-21-2 номінальною потужністю 1,5 кВт і номінальною частотою обертання 2860 об/хв (рис. 5.1). Така заміна пов'язана з необхідністю забезпечення номінальної частоти обертання СГПМ і ЕПМЕТ – 250 об/хв – через черв'ячний редуктор з передавальним числом i = 12.

Функцію керування привідним АД покладено на перетворювач частоти фірми Lense 8200 Vector потужністю 1,5 кВт з живленням від однофазної мережі напругою 220 В. Вибір такого типу перетворювача частоти зумовлений наявністю в останнього опції векторного керування моментом на валу [25]. Для забезпечення цим перетворювачем номінального значення трифазної напруги живлення АД його обмотка статора була ввімкнена трикутником.

Зі створеним стендом проведено низку досліджень, спрямованих на визначення його основних параметрів.

Момент сухого тертя стенда на валу привідного асинхронного двигуна визначено вимірюванням динамометром сили *F*, прикладеної до нитки, намотаної на циліндричну поверхню муфти радіусом $r_{\rm M} = 0,05$ м, що з'єднує двигун з редуктором. У результаті вимірювань отримано $M_{\rm c.crt(A,I)} = F r_{\rm M} = 1,03$ Н·м.



Рис. 5.1. Експериментальний стенд для дослідження розроблених систем керування електротепловими ВЕУ з ВВО: 1 – макетний взірець блока генераторів, 2 – привідний асинхронний двигун, 3 – редуктор, 4 – перетворювач частоти,

5 – контролер

Момент інерції стенда, приведений до валу асинхронного двигуна, $J_{cr(AД)}$ визначили за методом Атвуда – руху під дією одного вантажу, причому для виключення з обчислення сили тертя, необхідно провести два експерименти з двома різними вантажами [12]. Кожен з них по черзі підвішували на шнурі, перекинутому через блок і намотаному на тій же поверхні муфти радіусом $r_{\rm M}$. Під дією своєї ваги вантаж опускався рівноприскорено з висоти h = 2,44 м, при цьому ми вимірювали час його руху. Після серії проведених дослідів й усереднення їхніх результатів отримано: для вантажу масою 4 кг час опускання $t_{on1} = 1,385$ с, для вантажу масою 6 кг – $t_{on2} = 0,987$ с. При цьому отримані значення прискорень відповідно становили: $a_1 = 2h/t_{on1}^2 = 2,544$ м/с², $a_2 = 2h/t_{on2}^2 = 5,01$ м/с². Значення моменту інерції стенда обчислено за виразом [12]

$$J_{\rm ct(A,I)} = r_{\rm M}^2 \frac{m_2 \left(\frac{g}{2h} - \frac{1}{t_{\rm onl}^2}\right) - m_1 \left(\frac{g}{2h} - \frac{1}{t_{\rm on2}^2}\right)}{t_{\rm on2}^{-2} - t_{\rm on2}^{-2}}$$
(5.1)

і ставить 0,0247 кг·м².

Двоякірний СГПМ з p = 12 кількістю пар полюсів поміщено в дюралевому корпусі (рис. 5.2). Однойменні фазні обмотки обох гладких (беззубцевих) якорів виставлено синфазно та ввімкнено послідовно. Виміряні параметри однієї фазної обмотки: R = 0,528 Ом, L = 1,1 мГн. Отримане в досліді неробочого ходу значення амплітуди потокозчеплення обмотки якоря в розрахунку на один полюс індуктора становило $\Phi_{\rm m} = 0,0594$ Вб.

Керування роботою експериментального стенда здійснюється контролером WP130 MK II Controller (рис. 5.3) компанії Mita-Teknik [167]. Контролер WP130 MK II спеціально розроблений для керування системами вітрових турбін малого та середнього розміру з номінальною потужністю до 1 МВт. Цей пристрій включає набір різних каналів вводу/виводу, як для цифрових, так і для аналогових сигналів. Це дає змогу використовувати контролер як автономний пристрій (без додаткових модулів) для керування менш складними системами. Водночас, до основного контролера можна під'єднати до 3-ох додаткових модулів вводу/виводу серії «WP-Line», у випадку, якщо для інтерфейсу необхідно більше каналів. Додатково WP130 MK II контролер може бути розширено декількома групами вводу/виводу через магістральний високошвидкісний інтерфейс.

Контролер використовує передову операційну систему, розроблену компанією Mita-Teknik на базі NucleOS з програмною підтримкою відмовостійкої флеш файлової системи, TCP/IP стек протоколів, WEB-сервера, plug-and-play ідентифікації будь-яких WP-Line модулів, статус кодів, статистичних даних за останні 30 років, текстового та графічного меню, а також запису подій і помилок системи. Контролер підтримує IEC 61131-3 (CoDeSys) PLC мови програмування, а також розширене програмування мовами С та C++, використовуючи середовище програмування РЕРТООL.



Рис. 5.2. Двоякірний СГПМ в експериментальному стенді для дослідження розроблених систем електротеплових ВЕУ



Рис. 5.3. Зовнішній вигляд контролера WP130 MK II Controller

Завдяки розробленому компанією Mita-Teknik SDK для середовища MATLAB/Simulink стало можливим скомпілювати вихідний код Simulink моделі, для платформи WP130 MK II контролера. Для цього необхідно попередньо задати в розробленій моделі блоки вхідних і вихідних змінних контролера, які зв'яжуть MATLAB/Simulink алгоритми 3 параметрами програми контролера та входами/виходами каналів інтерфейсу. Після цього середовище програмування РЕРТООЬ дає змогу збудувати скомпільований код у програму, для WP130 MK II контролера. Таким чином, створивши систему керування віртуальним об'єктом в середовищі MATLAB/Simulink, можна застосувати розроблений і відлагоджений алгоритм для реалізації САК реального об'єкта на базі контролера компанії Міta-Teknik.

Для отримання результатів роботи контролера WP130 MK II, а також для налагодження роботи програми, операційною системою контролера передбачено запис значень будь-яких змінних з бази даних у файл у режимі реального часу. Такі файли можна відкривати за допомогою програми моніторингу Gateway SCADA, розробленої компанією Mita-Teknik. Записані дані змінних можуть бути представлені у вигляді осцилограм або табличних значень.

5.2. Фізичний симулятор роботи ВР на турбулентному вітрі

Привідний АД на експериментальному стенді (рис. 5.1) призначений для фізичної симуляції роботи ВР з ВВО на заданому профілі швидкості вітру подібно до того, як це зроблено в роботах [5, 137, 138].

формування Для закону керування моментом АД, який адекватно роботу BP на заданому профілі симулюватиме вітру, розглянемо ДBİ електромеханічні системи (рис. 5.4): а) ВЕУ з ВВО, в якій ВР прямо приводить в рух блок генераторів; б) експериментальний стенд з керованим АД, який приводить у рух блок генераторів через редуктор з передавальним числом і.

Баланс моментів на валу блока генераторів, за умови абсолютної жорсткості механічної трансмісії, для обох цих систем описують такі рівняння:

- для ВЕУ з ВВО відповідно до рівняння (2.14)

$$M_{\rm BP} = M_{\rm em} + M_{\rm c} + b\omega + J_{\Sigma} \frac{{\rm d}\omega}{{\rm d}t}; \qquad (5.2)$$

для експериментального стенда, знехтувавши люфтом в механічній передачі,

$$iM_{\rm AJI} = M_{\rm eM} + M_{\rm c.ct(G)} + J_{\rm ct(G)} + b_{\rm ct(G)}\omega + \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}, \qquad (5.3)$$

де $M_{\rm AII}$ – момент, що створює АД;

 $M_{c.ct(G)}, J_{ct(G)}, b_{ct(G)}$ – відповідно момент сухого тертя, момент інерції та коефіцієнт в'язкого тертя стенда, приведені до валу блока генераторів.



Рис. 5.4. Схеми електромеханічних систем: а) ВЕУ, б) дослідного стенда із симулятором роботи ВР

Врахувавши, що $M_{c.cr(G)} = i M_{c.cr(AД)}$, $J_{cr(G)} = i^2 J_{cr(AД)}$, $b_{cr(G)} = i^2 b_{cr(AД)}$, і вилучивши з рівнянь (5.2) і (5.3) M_{em} , отримуємо закон керування моментом на валу АД, який забезпечуватиме ідентичну роботу ВЕУ з ВВО та експериментального стенда, що здійснює фізичну симуляцію роботи ВР:

$$M_{\rm AJI} = \frac{1}{i} \left[M_{\rm BP} - \left(M_{\rm c} - i M_{\rm c.cr(AJI)} \right) - \left(b - i^2 b_{\rm cr(AJI)} \right) \omega - \left(J_{\Sigma} - i^2 J_{\rm cr(AJI)} \right) \frac{\mathrm{d}\,\omega}{\mathrm{d}\,t} \right].$$
(5.4)

Для фізичного моделювання роботи електротеплових ВЕУ з періодичним та імпульсним низькочастотним навантаженням ВР, за допомогою розроблених у підрозділах 4.1 і 4.2 математичних моделей (відповідно Додатки Б і В) проведені дослідження, які показали, що для двоякірного СГПМ стенда, параметри якого наведено вище, найкраще з приведених у табл. 2.2 підходить ВР потужністю 0,5 кВт. Його параметри й були закладені в математичну модель симулятора (5.4) для обчислення $M_{\rm BP}$ в режимі реального часу на різних швидкостях вітру при різних кутових швидкостях ВР.

На функціональній схемі стенда для дослідження електротеплових ВЕУ (рис. 5.5) фізичний симулятор роботи ВР на турбулентному вітрі показано окремим блоком ФСВР, до складу якого входить АД, перетворювач частоти ПЧ і редуктор Р, що з'єднує АД з блоком генераторів – СГПМ та ЕПМЕТ. Усі функції керування, у тому числі й симулятором роботи ВР, здійснюються контролером К. Для цього в останньому реалізовано підпрограми обчислення турбулентної швидкості вітру відповідного їй значення механічного моменту ВР за виразом (1.12) з врахуванням залежності $C_P(\lambda)$ (1.16) і завдання на поточний момент АД за виразом (5.4). Для обчислення двох останніх необхідна кутова швидкість ВР з СГПМ. Вона вимірюється імпульсним індукційним давачем частоти ДЧ обертання ротора АД (рис. 5.6), який спрацьовує за кожного підходу до нього 4-х лопатей вентилятора охолодження АД. Імпульси від ДЧ подаються на імпульсний вхід контролера, який за власною програмою здійснює цифрове фільтрування та з врахуванням передавального числа редуктора обчислює кутову швидкість СГПМ.

Завдяки можливості вимірювання частоти обертання АД і заданого йому за допомогою ПЧ механічного моменту знято механічну характеристику стенда за його неробочого ходу, з якої визначено коефіцієнт в'язкого тертя на осі блока генераторів: $b_{ct(AJI)} = 0,0013 \text{ H} \cdot \text{m} \cdot \text{c}.$







Рис. 5.6. Фото імпульсного давача частоти обертання асинхронного двигуна

На рис. 5.7 показана загальна комп'ютерна модель системи керування стендом, реалізована в середовищі MATLAB/Simulink з під'єднаними блоками входу/виходу змінних контролера. У цій системі керування реалізовано роботи BP разом підсистемами керування періодичним симулятор 3 навантаженням СГПМ (Puls Control Subsystem), імпульсним низькочастотним навантаженням СГПМ (Impuls Control Subsystem) і підсистемою оптимального керування збудженням ЕПМЕТ (If EPMET). Система керування симулятором має один дискретний вхід DI_RotorFreq – частота імпульсів давача швидкості АД й один аналоговий вихід AO_TorqueSP_V – завдання на електромагнітний момент асинхронного двигуна M^*_{AI} . У системі передбачено запис в пам'ять контролера таких змінних: $V_{\text{в}}, \omega, \lambda, C_{\text{P}}, M_{\text{BP}}, M_{\text{AII}}^*$.



Рис. 5.7. Загальна система керування стендом для проведення комплексу експериментальних досліджень, реалізована в середовищі MATLAB/Simulink, зв'язаним зі змінними WP130 MK II контролера

Перевірку адекватності створеної системи симулятора роботи ВР спочатку було проведено на розробленій комп'ютерній моделі дослідного стенда. Результати проведених досліджень повністю збігалися з аналогічними, отриманими в тих же режимах роботи на комп'ютерній моделі дослідної ВЕУ.

Адекватність реалізації фізичного симулятора роботи ВР перевірено в режимі генерування електричної енергії – навантаженням СГПМ на АБ з напругою в режимі заряджання 13,2 В.

Спочатку фізично моделювали роботу ВЕУ в усталених режимах на вітрах постійної заданої швидкості від 3 до 8 м/с. Результати експерименту у вигляді записаних контролером і зчитаних з нього комп'ютером осцилограм основних координат представлено на рис. 5.8. На рис. 5.9 наведені результати аналогічного дослідження, проведеного комп'ютерним моделюванням роботи дослідної ВЕУ. Порівняння значень однойменних координат на цих рисунках в усталених режимах роботи ВЕУ показує, що максимальне відхилення експериментальних результатів від теоретичних не перевищує 10%.

Порівняння виміряних на стенді значень струму заряджання АБ з отриманими на комп'ютерній моделі (рис. 5.9, д) за різних значень швидкості вітру з її робочого діапазону здійснено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Vв, м/с	5	6	7	8
Експеримент ІАБ, А	2,6	4,3	6,4	8,1
Модель ІАБ, А	2,2	3,8	5,7	7,8
Похибка, %	18,1	13,1	12,2	3,8

Порівняння значень струму заряджання АБ, отриманих в експерименті та на імітаційній комп'ютерній моделі



Рис. 5.8. Часові залежності основних координат дослідної ВЕУ в усталених режимах роботи на різних швидкостях вітру з генеруванням електричної енергії прямим заряджанням АБ, отримані на дослідному стенді (зверху вниз): тестова швидкість вітру, коефіцієнт використання потужності вітру, швидкохідність ВР, кутова швидкість ВР, завдання на момент АД

Для перевірки адекватності роботи симулятора ВР у динамічних режимах проведено експеримент роботи дослідної ВЕУ в режимі генерування електричної енергії при роботі на вітрі змінної швидкості. Тестову швидкість вітру моделювали виразом, подібним до (4.10),

$$V_{\rm B} = V_{\rm B,cep} + 2.2\sin(\omega_{\rm B}t - 0.8) - 0.7\cos(8\omega_{\rm B}t + 1.1)$$
(5.5)

зі середньою швидкістю вітру $V_{\text{в.сер}} = 5$ м/с і нижньою коловою частотою зміни швидкості вітру $\omega_{\text{в}} = 0,24 \cdot 2\pi/60$ с⁻¹.

На рис. 5.10 і 5.11 приведені результати відповідно фізичного та математичного експериментів роботи стенда з дослідною ВЕУ та симулятором ВР і самої дослідної ВЕУ на вітрі з тестовим профілем (5.5). Порівняння цих результатів показує їхню високу узгодженість (максимальна похибка не перевищує 15%).


Рис. 5.9. Часові залежності основних координат дослідної ВЕУ в усталених режимах роботи на різних швидкостях вітру з генеруванням електричної енергії прямим заряджанням АБ, отримані комп'ютерним симулюванням: а) тестова швидкість вітру, б) коефіцієнт використання потужності вітру,
в) швидкохідність ВР, г) кутова швидкість ВР, д) струм, що заряджає АБ



Рис. 5.10. Часові залежності основних координат дослідної ВЕУ в динамічних режимах роботи на тестовій швидкості вітру з генеруванням електричної енергії прямим заряджанням АБ, отримані експериментально на дослідному стенді (зверху вниз): коефіцієнт використання потужності вітру, швидкохідність ВР, кутова швидкість ВР, тестова швидкість вітру

5.3. Експериментальні дослідження роботи макетного взірця електротеплової автономної ВЕУ з періодичним навантаженням СГПМ

Для побудови системи керування експериментальним стендом електротеплової ВЕУ з фізичним симулятором роботи ВР і реальним двоякірним СГПМ у режимі періодичного навантаження генератора за розробленою в підрозділі 4.1 програмою в середовищі Mathcad (Додаток Б) проведено дослідження для дослідної ВЕУ з параметрами стенда. Вони показали, що для заданих параметрів ВР і СГПМ у діапазоні швидкостей вітру 3,5...7,5 м/с режим періодичного навантаження СГПМ реалізується за активних опорів навантаження генератора величиною $R_{\rm T} = 0,2...0,5$ Ом при їхньому з'єднані в зірку.



Рис. 5.11. Часові залежності основних координат дослідної ВЕУ в динамічних режимах роботи на тестовій швидкості вітру з генеруванням електричної енергії прямим заряджанням АБ, отримані комп'ютерним симулюванням: а) тестова швидкість вітру, б) коефіцієнт використання потужності вітру,

в) швидкохідність ВР, г) кутова швидкість ВР

Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено 3 достатньо потужні резистори, намотані проводом з високим питомим опором (позиція 1 на рис. 5.12). Виміряні значення їхніх активних опорів дали такий результат $R_{\rm T} = 0,305\pm8,2\%$ Ом. Це забезпечує досить низьке значення ККД генератора ($\eta_{\rm G} = 0,366$), проте дає можливість фізично змоделювати бажаний режим роботи макетного взірця електротеплової ВЕУ.

Розрахована для параметрів стенда за виразом (4.1) залежність, необхідна для квазіоптимального періодичного керування навантаженням СГПМ, апроксимована залежністю

$$\varepsilon_1 = -0.07164 - 0.001408\omega + 0.001262\omega^2.$$
(5.6)



Рис. 5.12. Світлина вузла навантаження СГПМ у дослідному стенді: 1 – опори навантаження, 2 – амперметр у колі лінійного струму навантаження, 3 – давач струму, 4 – симісторний блок, 5 – трифазний діодний міст,

6 – акумуляторна батарея, 7 – амперметр у колі акумуляторної батареї

Як показано на принциповій схемі дослідного стенда (рис. 5.5), опори навантаження СГПМ Rт, що імітують ТЕНи, підключені до обмотки якоря генератора через два симістори ВТА40800В силового комутатора СК (позиція 4 на рис. 5.12). Останні вмикаються в момент переходу прикладеної до них напруги

через нульове значення за допомогою спеціальних оптосимісторних драйверів MOC3082, керованих безпосередньо вихідним дискретним сигналом величиною 24 В від контролера (дискретний вихід DO_LoadSwitchControl на рис. 5.7). Для вимірювання миттєвих значень струму через один з опорів навантаження застосовано давач струму BI типу EH050AP фірми LEM, побудований на ефекті Холла (позиція 3 на рис. 5.12).

Система дискретного періодичного керування навантаженням СГПМ реалізована в підсистемі контролера Puls Control Subsystem (рис. 5.7) за своєю комп'ютерною моделлю в середовищі MATLAB/Simulink (рис. 4.6).

На рис. 5.13 приведено осцилограми основних координат за роботи дослідної електротеплової ВЕУ в режимі генерування теплової енергії періодичним навантаженням СГПМ, отримані відповідно в ході експерименту на дослідному стенді безпосереднім вимірюванням і подальшим обчисленням контролером. На рис. 5.14 показано в тому ж порядку розміщення аналогічні осцилограми, отримані комп'ютерним симулюванням роботи дослідної ВЕУ. Аналіз експериментально отриманих результатів засвідчує працездатність запропонованого способу періодичного навантаження СГПМ і відповідність заданим параметрам квазіоптимального керування: забезпечуються значення швидкохідностей ввімкнення λ_{on} та вимкнення λ_{off} навантаження, а також близьке до максимального значення $C_{\text{Pmax}} = 0.3514$ у діапазоні робочих швидкостей вітру. Однак спостерігаємо деяку розбіжність у робочих діапазонах – у фізичному експерименті періодичне навантаження здійснюється й на швидкостях вітру понад 7 м/с, тоді як в обчислювальному експерименті вже за швидкості вітру, більшої 6,5 м/с, навантаження залишається постійно ввімкненим. Ця розбіжність пояснюється пульсацією в обчисленому контролером значенні кутової швидкості АД за сигналом імпульсного давача. Не зважаючи на фільтрування цієї пульсації, наступне дискретне диференціювання кутової швидкості, за яким визначається кутове прискорення, вносить додаткові похибки в роботу алгоритму періодичного навантаження.



Рис. 5.13. Часові залежності основних координат за роботи дослідної електротеплової ВЕУ в режимі генерування теплової енергії періодичним навантаженням СГПМ, отримані експериментально на дослідному стенді (зверху вниз): коефіцієнт використання потужності вітру, швидкохідність ВР, логічний сигнал на ввімкнення навантаження СГПМ, кутова швидкість ВР, тестова швидкість вітру

На рис. 5.14, е наведена також отримана в ході комп'ютерного симулювання осцилограма теплової потужності, що виділяється в ТЕНах, якої нема на рис. 5.13, оскільки безпосередньо виміряти цю потужність в експерименті було складно. Проте ця осцилограма добре показує зв'язок генерованої теплової потужності з осцилограмами інших координат, наведеними на вказаному рисунку, та відображає роботу системи періодичного навантаження.

На рис. 5.15 наведено також осцилограми струму в одному з опорів навантаження, зняті на дослідному стенді за допомогою давача струму та цифрового осцилографа RIGOL, за різних значень швидкості вітру, які ілюструють роботу системи періодичного навантаження СГПМ.



Рис. 5.14. Отримані на комп'ютерній моделі часові залежності основних координат за роботи дослідної електротеплової ВЕУ в режимі генерування теплової енергії за допомогою періодичного навантаження СГПМ



Рис. 5.15. Записані цифровим осцилографом часові залежності струму в одному з опорів навантаження за низької (а) та середньої (б) швидкості вітру при періодичному навантаженні СГПМ

(одній клітинці по осі ординат відповідає значення струму 6,5 А)

5.4. Експериментальні дослідження роботи макетного взірця електротеплової автономної ВЕУ з імпульсним низькочастотним навантаженням СГПМ

Для побудови системи керування експериментальним стендом електротеплової ВЕУ з фізичним симулятором роботи ВР і реальним двоякірним СГПМ у режимі імпульсного низькочастотного навантаження генератора за розробленою в підрозділі 4.2 програмою в середовищі Mathcad (Додаток В) проведено дослідження для дослідної ВЕУ з параметрами стенда. Вони показали, що для заданих параметрів ВР і СГПМ у діапазоні швидкостей вітру 3,5...7 м/с режим імпульсного низькочастотного навантаження СГПМ на активні опори тієї ж величини, що й у попередньому підрозділі ($R_{\rm T} = 0,305$ Ом), реалізується за кількості періодів напруги генератора k = 12 в періоді числоімпульсного регулювання. З математичної моделі отримано також закон оптимального керування ВЕУ імпульсним низькочастотним навантаженням СГПМ:

$$n_{\rm opt} = 4,705 + 2,064\,\omega\,. \tag{5.7}$$

Для експериментів використано той же дослідний стенд (рис. 5.1). Для генерування електричної енергії в ньому застосовано свинцево-кислотну акумуляторну батарею АБ напругою 12 В, яка підключена до обмотки якоря СГПМ через трифазний мостовий діодний випрямляч VD (рис. 5.5 і 5.12).

Система імпульсного низькочастотного керування навантаженням СГПМ реалізована в контролері в підсистемі Impuls Control Subsystem (рис. 5.7) за своєю комп'ютерною моделлю в середовищі MATLAB/Simulink (рис. 4.16). Додатковим вхідним сигналом для роботи цієї підсистеми є дискретний сигнал DI_VoltageZeroValue (рис. 5.7), що формується за допомогою одного транзистора з фазної напруги СГПМ у момент її переходу через нуль.

На рис. 5.16 та 5.17 приведено осцилограми основних координат роботи дослідної електротеплової ВЕУ в режимі генерування теплової енергії імпульсним низькочастотним навантаженням СГПМ за тестового профілю вітру,

частину з яких ми отримали в ході експерименту на дослідному стенді шляхом безпосереднього вимірювання, а частину – в результаті обчислення контролером. Аналіз експериментально отриманих результатів засвідчує працездатність запропонованого способу імпульсного низькочастотного навантаження СГПМ і відповідність заданим параметрам оптимального керування: забезпечується близьке до оптимального значення швидкохідності ВР ввімкнення $\lambda_{opt} = 0,3675$, а також близьке до максимального значення $C_{Pmax} = 0,3514$ в діапазоні робочих швидкостей вітру.

На рис. 5.18 показано в тому ж порядку розміщення, що й на рис. 5.16, аналогічні осцилограми, отримані комп'ютерним симулюванням роботи дослідної ВЕУ за імпульсного низькочастотного керування навантаженням СГПМ. Порівняння часових залежностей однойменних координат, отриманих у фізичному та математичному експериментах, показує їхню добру збіжність – похибка в робочому діапазону швидкостей вітру не перевищує 20%.

На рис. 5.18, д наведена також отримана в ході комп'ютерного симулювання осцилограма теплової потужності, що виділяється в ТЕНах, якої нема на рис. 5.16, оскільки безпосередньо виміряти цю потужність в експерименті було складно. Проте ця осцилограма добре показує зв'язок генерованої теплової потужності з осцилограмами інших координат, наведеними на вказаному рисунку, та відносно високу частоту імпульсів потужності за роботи системи імпульсного низькочастотного навантаження.

На рис. 5.19 приведено осцилограми струму в одному з опорів навантаження, зняті на дослідному стенді за допомогою давача струму та цифрового осцилографа RIGOL, за різних значень швидкості вітру, які ілюструють роботу періодичного навантаження СГПМ.



Рис. 5.16. Часові залежності основних координат за роботи дослідної електротеплової ВЕУ в режимі генерування теплової енергії імпульсним низькочастотним керуванням навантаження СГПМ, отримані експериментально на дослідному стенді (зверху вниз): коефіцієнт використання потужності вітру, швидкохідність ВР, логічний сигнал на ввімкнення навантаження СГПМ, кутова швидкість ВР, тестова швидкість вітру



Рис. 5.17. Фрагмент, вирізаний з рис. 5.16, з додатково наведеною внизу осцилограмою дискретного сигналу переходу через нуль фазної напруги СГПМ



Рис. 5.18. Часові залежності основних координат за роботи дослідної електротеплової ВЕУ в режимі генерування теплової енергії імпульсним низькочастотним навантаженням СГПМ, отримані на комп'ютерній моделі: а) коефіцієнт використання потужності вітру, б) швидкохідність ВР, в) кутова швидкість ВР, г) тестова швидкість вітру, д) теплова потужність



Рис. 5.19. Записана цифровим осцилографом часова залежність струму в одному з опорів навантаження при імпульсному низькочастотному регулювання навантаження СГПМ

(одній клітинці по осі ординат відповідає значення струму 6,5 А)

5.5. Експериментальні дослідження роботи макетного взірця автономної когенераційної ВЕУ

Експериментальні дослідження роботи автономної когенераційної ВЕУ спрямовані на верифікацію ефективності роботи розробленої в підрозділі 4.3 САК ЕПМЕТ як нового об'єкта керування.

Керування роботою ЕПМЕТ здійснено регулюванням його струму збудження за допомогою понижувального перетворювача постійної напруги ППН, який живиться від АБ напругою 12 В (рис. 5.5). Напруга керування перетворювачем подається від контролера К через його аналоговий вихід.

Експериментально, за допомогою метода амперметра та вольтметра на постійному та змінному струмах, визначені значення активного опору обмотки збудження ЕПМЕТ $R_{\rm f} = 3,97$ Ом та її індуктивності $L_{\rm f} = 0,328$ Гн. Зважаючи на

невелике значення електромагнітної сталої часу обмотки збудження $T_{\rm e} = L_{\rm f}/R_{\rm f} = 0,0826$ с, регулювання струму збудження ЕПМЕТ здійснювали в розімкненій схемі без регулятора струму.

У контролері реалізована САК ВЕУ через ЕПМЕТ за комп'ютерною моделлю (рис. 4.30). Вона практично зводилася до оптимального регулювання струму збудження за допомогою таблично заданої в блоці Look-Up Table 1 регулювальної функції, показаної на рис. 5.20 і знайденої на підставі експериментально отриманих характеристик макетного взірця ЕПМЕТ (рис. 4.24). Автоматичне регулювання здійснювалося за виміряним значенням кутової швидкості ротора ЕПМЕТ w (через кутову швидкість привідного асинхронного двигуна).



Рис. 5.20. Регулювальна характеристика ЕПМЕТ у макетному взірці дослідної когенераційної ВЕУ

На рис. 5.21 наведено результати експериментальних досліджень роботи дослідної когенераційної ВЕУ в режимі генерування теплової енергії за заданого тестового профілю швидкості вітру. Як видно з отриманих часових залежностей, оптимальне регулювання струму збудження ЕПМЕТ призводить до такого механічного навантаження ВР, що його кутова швидкість забезпечує оптимальну швидкохідність ВР, близькі до максимального значення коефіцієнта використання потужності вітру C_P , а звідси й максимальну генеровану в роторі ЕПМЕТ теплову потужність. Крім того, в САК задано мінімальне значення кутової швидкості ВР з ЕПМЕТ – 10 рад/с. Тому на малих швидкостях вітру завдання на напругу збудження починає регулюватися двопозиційно – вмикається та вимикається, підтримуючи стабільну кутову швидкість ВР.

На рис. 5.22 у тому ж порядку розміщення, що й на рис. 5.21, показано аналогічні осцилограми, отримані за комп'ютерного симулювання роботи дослідної ВЕУ в режимі генерування теплової енергії за допомогою ЕПМЕТ. Порівняння часових залежностей однойменних координат, отриманих у фізичному та математичному експериментах, показує їхню достатню збіжність – похибка в робочому діапазоні швидкостей вітру не перевищує 20%.



Рис. 5.21. Часові залежності основних координат дослідної когенераційної ВЕУ в режимі генерування ЕПМЕТ теплової енергії, отримані експериментально на дослідному стенді (зверху вниз): коефіцієнт використання потужності вітру, швидкохідність ВР, кутова швидкість ВР, тестова швидкість вітру, напруга завдання на струм збудження ЕПМЕТ



Рис. 5.22. Часові залежності основних координат дослідної когенераційної ВЕУ в режимі генерування ЕПМЕТ теплової енергії, отримані комп'ютерним симулюванням: а) коефіцієнт використання потужності вітру, б) швидкохідність ВР, в) кутова швидкість ВР, г) тестова швидкість вітру, д) напруга завдання на струм збудження ЕПМЕТ, е) теплова потужність, що виділяється в роторі ЕПМЕТ

5.6. Висновки до розділу

1. Розроблений, апаратно й програмно, симулятор роботи ВР на заданому профілі вітру дає змогу проводити різноманітні фізичні експерименти на створеному дослідному стенді з реальними електричним СГПМ і тепловим генератором – ЕПМЕТ.

2. Проведені на дослідному стенді експерименти роботи електротеплових ВЕУ в режимі генерування теплової енергії шляхом періодичного та імпульсного низькочастотного навантаження СГПМ підтвердили достовірність розроблених математичних моделей і побудованих на їхній основі методик проектування таких систем, а також дієвість створених систем керування.

3. Експериментальні дослідження роботи когенераційної ВЕУ в режимі генерування теплової енергії за допомогою створеного теплового генератора – ЕПМЕТ показали ефективність використання такої системи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача – створення нових систем керування автономними вітроустановками малої потужності, які забезпечують ефективне генерування як електричної, так і теплової енергії, що розширює функціональні можливості таких ВЕУ, підвищує їхню енергетичну ефективність та знижує вартість. Отримані в роботі результати дають можливість зробити такі загальні висновки.

1. Специфічні умови розміщення та роботи малопотужних ВЕУ зумовлюють інші вимоги до їхньої конструкції та відмінність перебігу процесів генерування енергії порівняно з традиційними ВЕУ великої потужності. Енергетично найефективнішою можна вважати таку конструкцію малопотужної ВЕУ: вертикальноосьовий швидкохідний 3-лопатевий Н-ротор, безредукторна трансмісія, багатополюсний СГПМ, АВН або пасивний випрямляч напруги з DC-DC перетворювачем і коректором струмів якоря генератора.

2. Встановлено, що аеромеханічна стала часу ВР є обернено пропорційна до швидкості вітру й зростає зі зменшенням потужності ВЕУ. Тому для малопотужних ВЕУ, які, відповідно до умов їхнього встановлення, переважно працюють за низько-швидкісних турбулентних вітрів, потрібні такі системи керування, які б забезпечували високу енергетичну ефективність з урахуванням перебігу аеродинамічних та електромеханічних процесів роботи ВЕУ в конкретних метеорологічних умовах.

3. Для ефективного керування процесом генерування електричної енергії в малопотужній ВЕУ з ВВО доцільно застосувати комбінований регулятор навантаження ВЕУ з такими новими функціями: оптимальне регулювання за збуренням швидкості вітру адаптується до умов роботи ВР – швидкості вітру й температури повітря – за допомогою нечіткого коректора швидкодія регулювання за відхиленням кутової швидкості ВР від усталеного оптимального значення вибирається з точки зору мінімізації сумарних аеродинамічних втрат ВР і втрат у

міді СГПМ. Таке регулювання дає додаткове підвищення генерованої електричної енергії на 2-7%, порівняно з найбільш поширеною системою керування за принципом ОТС, особливо на малих вітрах.

4. Для обмеження електричної потужності СГПМ при роботі ВЕУ з швидкохідним Н-ротором на швидкостях вітру, що перевищують номінальне значення, доцільніше застосувати stall-регулювання з розробленим регулятором потужності як таке, що знижує частоту обертання ВР. При цьому до необхідного для регулювання давача швидкості вітру не ставлять високих вимог, тому він може бути простим, недорогим і встановлюватися безпосередньо біля ВР.

5. Концепція автономних електротеплових ВЕУ, в яких теплова енергія генерується з попередньо генерованої електричної шляхом періодичного чи імпульсного низькочастотного навантаження СГПМ, дає змогу, окрім розширення функціональних можливостей ВЕУ, реалізувати прості й дешеві системи оптимального керування та зменшити ємність акумуляторних батарей, проте має низку недоліків, зокрема: неможливість реалізації режимів генерування електричної енергії на низьких швидкостях вітру та обмеження потужності ВЕУ на високих.

6. Запропонована концепція когенераційної автономної ВЕУ з ВВО з двома генераторами – електричним і тепловим – є складнішою, проте не має жодних обмежень щодо реалізації режимів генерування електричної й теплової енергії за будь-яких швидкостей вітру, а також обмеження потужності ВЕУ на високошвидкісних вітрах. Завдяки кращому використанню енергії вітру та можливості значного зниження встановленої ємності АБ, аж до їхнього повного виключення, вартість автономної ВЕУ можна суттєво знизити, а термін окупності – скоротити.

7. Створений симулятор роботи ВР дає змогу фізично моделювати на виготовленому дослідному стенді близьку до реальної роботу ВЕУ із заданими параметрами ВР на постійних і турбулентних вітрах.

8. Результати проведених експериментальних досліджень розроблених систем електротеплових ВЕУ збігаються з результатами симулювання на розроблених комп'ютерних імітаційних моделях у межах допустимої похибки до 20%, що підтверджує адекватність розроблених методик проектування таких ВЕУ та достовірність отриманих у результаті математичного моделювання показників ефективності їхньої роботи. Експериментальні дослідження роботи когенераційної ВЕУ в режимі генерування теплової енергії за допомогою новоствореного теплового генератора – ЕПМЕТ підтвердили ефективність застосування такої системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Алексеевский Д. Г. Анализ эффективности моментного управления электромеханической системой ВЭУ / Д. Г. Алексеевский // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки". – Чернігів: ЧДТУ, 2013. – №2(65). – С. 17-24.
- 2. Анализ преимуществ и недостатков вертикальных ветрогенераторов (ветряков, ветроустановок с вертикальной осью вращения) для электростанций малой мощности. 2014. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <u>http://vetrogenerator.com.ua/vetrogenerator/vertikal/218-analiz-preimuschestv-i-nedostatkov-vertikalnyh-vetrogeneratorov-vetryakov-vetroustanovok-s-vertikalnoy-osyu-vrascheniya-dlya-elektrostanciy-maloy-moschnosti.html.</u>
- Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Санкт-Петербург: Профессия, 2004. – 752 с.
- Білецький Ю. О. Енергоформуюче керування електромеханічними системами на базі синхронної машини з постійними магнітами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / Ю. О. Білецький. – Львів, 2014. – 20 с.
- Буров О. М. Електромеханічна система імітатора вітротурбіни: автореф. дис.
 на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / О. М. Буров. – Дніпропетровськ, 2013. – 22 с.
- Вашкевич К. П. Аэродинамические характеристики ветродвигателей ветроэлектрических установок / К. П. Вашкевич // Известия РАН. Энергетика. – 1997. – № 3. – С. 4-17.
- Веклинець І. І. Аналіз топологічних особливостей активних випрямлячів / І. І. Веклинець // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка».

Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2008. – № 613. – С. 230-239.

- Ветроэнергетические установки ООО "ГРЦ-Вертикаль". [Електронний pecypc] Режим доступу до pecypcy: <u>http://www.nii-uralmet.narod.ru/presentation/index.htm</u>.
- Воронин С. М. Работа ветроустановки при изменении направления ветра / С. М. Воронин, Л. В. Бабина // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 98–100.
- Герасимов А. Ветроэнергетические установки для автономного электроснабжения / А. Герасимов, В. Толмачев, К. Уткин // Новости ЭлекроТехники. – 2016. – № 5(101). [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <u>http://www.news.elteh.ru/arh/2006/38/06.php</u>.
- Герасимов А. Ветроэнергетические установки. Системы адаптивного управления / А. Герасимов, В. Толмачев, К. Уткин // Новости ЭлекроТехники. 2016. № 5(101). [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <u>http://www.news.elteh.ru/arh/2006/40/14.php</u>.
- Гернет М. М. Определение моментов инерции / М. М. Гернет,
 В. Ф. Ратобыльский. Москва: Машиностроение, 1969. 247 с.
- Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления / В. И. Гостев. – Київ: Радіоаматор, 2008. – 972 с.
- 14. Жуков О. А. Математичні моделі та пристрої для автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання: автореф. дис. ... на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / О. А. Жуков – Вінниця, 2011. – 17 с.
- 15. Климко В. І. Вітросонячні системи електроживлення малопотужних споживачів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / В. І. Климко. – Львів, 2016. – 20 с.

- 16. Ковальчук А. І. Електромеханічна система безконтактної контрроторної вітроелектроустановки з вертикальною віссю обертання: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / А. І. Ковальчук. – Львів, 2015. – 20 с.
- 17. Козирський В. В. Обґрунтування принципів адаптивного регулювання навантаження сільськогосподарських автономних вітроелектричних установок / В. В. Козирський, М. І. Трегуб, А. В. Петренко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів та природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – К., 2013. – Вип. 166, ч.3. – с. 22 – 31.
- 18. Кувшинов В. В. Підвищення потужності серійних сонячних установок при комбінованому виробленні теплової і електричної енергії: автореф. дис. ... на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.08 «Перетворювання відновлюваних видів енергії» / В. В. Кувшинов. Київ, 2012. 19 с.
- Кузьо І. В. Обгрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності / І. В. Кузьо, В. М. Корендій // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – № 679. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка», 2010. – С. 61–68.
- Легошин Д. В. Енергетична ефективність автономної вітроелектроустановки зі стабілізацією частоти обертання ротора за умов косого обдування: автореф. дис. ... на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.08 «Перетворювання відновлюваних видів енергії» / Д. В. Легошин. – Київ, 2012. – 19 с.
- Лозинський А. О. Система керування вітроустановкою на базі нечіткого регулятора з врахуванням зміни аеродинамічних параметрів вітроротора / А.О. Лозинський, В. І. Щур // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Вип. 3/2015 (31). – Кременчук: Кременч. націон. ун-т ім. М. Остроградського, 2015. – С. 10-21.

- Патент на винахід № 103262, МПК F03D 7/04 (2006.01), F03D 9/02 (2006.01). Спосіб перетворення механічної енергії вітроколеса та система для його реалізації / Щур І. З., Щур В. І.; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». – № а 2012 05125; заявл. 25.04.2012; опубл. 25.09.2013, Бюл. №18.
- 23. Патент на винахід № 105743, МПК F03D 9/02 (2006.01), Н05В 6/10 (2006.01).
 Вітрова теплоелектростанція / Щур І. З., Макарчук О. В., Щур В. І., Климко В.І.; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». № а 2013 08843; заявл. 15.07.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. №11.
- 24. Петренко А. В. Комбінована електроводопостачальна вітроустановка з магнітоелектричним лінійним генератором зворотно-поступального руху: автореф. дис. ... на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / А. В. Петренко. – Київ, 2012. – 24 с.
- 25. Преобразователи частоты серии 8200 Vector 0,25...90 кВт. Руководство по эксплуатации. Київ: СВ Альтера, 2012. 92 с.
- 26. Рожкова Л. Г. Концентратори вихрових потоків вертикально-осьових вітроустановок для підвищення коефіцієнта використання енергії вітру / Л. Г. Рожкова, С. П. Кулініч // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 5. – № 59. – С. 20-23.
- 27. Рудий Т. В. Дослідження методами математичного моделювання електромеханічної системи вітроенергетичної установки з оптимальним відбором потужності вітродвигуна і стабілізацією частоти на виході інвертора струму: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / Т. В. Рудий. – Львів, 1995. – 308 с.
- Сєріков Я. О. Вітроенергетика. Перспективи та проблеми розвитку / Я. О. Сєріков, О. М. Пархоменко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2010. – № 1. – С. 66–70.

- Скаржепа В. А. Цыфровое управление тиристорными преобразователями / В. А. Скаржепа, К. В. Шелехов. – Москва: Энергоатомиздат. Ленинград. отделение, 1984. – 160 с.
- З0. Соломин Е. В. Ветроэнергетические установки ГРЦ-Вертикаль /
 Е. В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 1. –
 С. 10-15.
- 31. Типы ветроэнергетических установок. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <u>http://www.diagram.com.ua/list/alter-energy/alter-energy245.shtml</u>.
- 32. Титко Р. Відновлювані джерела енергії (досвід Польщі для України) /
 Р. Титко, В. Калініченко. Варшава: ОWG, 2010. 532 с.
- 33. Толмачев В. Н. Эффективное использование энергии ветра в системах автономного энергообеспечения / В. Н. Толмачев, А. В. Орлов, В. А. Булат. Санкт-Петербург: ВИТУ, 2002. 203 с.
- 34. Трегуб М. І. Підвищення енергоефективності автономних сільськогосподарських вітроенергетичних систем / М. І. Трегуб, В. В. Козирський // Нова тема. 2010. №2. С. 47 50.
- Шефтер Я. И. Использование энергии ветра / Я. И. Шефтер. Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.
- 36. Щур В. І. Математична модель турбулентного вітропотоку для комп'ютерного і фізичного моделювання роботи вітроустановок / В. І. Щур // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Матер. X Міжн. наук.-техн. конф. мол. учених і спец., 28-29 березня 2012 р., м. Кременчук. – Кременчук: Кременч. націон. ун-т ім. М. Остроградського. – С. 199-200.
- 37. Щур В. І. Система керування енергопотоками в когенераційній автономній вітроенергоустановці / В. І. Щур // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Силовая

электроника и энегоэффективность. – № 12 (1121). – Харьков, 2015. – С. 414-419.

- 38. Щур В. І. Система керування навантаженням генератора вітроустановки в умовах турбулентних вітрів / В. І. Щур // Тези XII Міжн. наук.-практ. конф. «Від-новлювальна енергетика XXI століття», 12-16 вересня 2011 р., смт. Миколаївка, Крим. – К.: Ін-т відновл. енергетики НАНУ. – С. 283-289.
- Щур В. І. Система низькочастотного імпульсного навантаження синхронного генератора з постійними магнітами в автономних вітроенергоустановках / В. І. Щур // Вісник Націон. техн. ун-ту «Харків. політехн. ін-т»: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. № 36(1009). Харків, 2013. С. 161-164.
- 40. Щур І. З. Автономна вітроенергоустановка з акумулюванням електричної і теплової енергій / І. З. Щур, В. І. Щур // Енергетика і автоматика. 2012. № 2. К.: Націон. ун-т біоресурсів і природокористування України. С. 8-16.
- 41. Щур І. З. Електромагнітний генератор теплової енергії для автономних вітроенергоустановок з вертикальною віссю обертання / І. З. Щур, О. В. Макарчук, В. І. Щур, П. Й. Голубовський // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – № 834. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка», 2015. – С. 88-94.
- Щур І. З. Оптимальне керування вітроустановками різної потужності в умовах турбулентних вітрів / І. З. Щур, В. І. Щур // Вісн. Націон. ун-ту «Львівська політехніка»: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – № 736. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка», 2012. – С. 146-152.
- 43. Янсон Р. А. Ветроустановки / Р. А. Янсон. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 36 с.
- 44. Abdolghani N. A direct torque control method for CSC based PMSG wind energy conversion systems / N. Abdolghani, J. Milimonfared, G. B. Gharehpetian //

International Conference on Renewable Energies and Power Qualty (ICREPQ'12), 28-30 March 2012, Spane. – 7 p.

- 45. Abdullah M. A. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems / M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, C. W. Tan, R. Saidur // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16. – P. 3220-3227.
- 46. Agarwal V. A novel scheme for rapid tracking of maximum power point in wind energy generation systems / V. Agarwal, R. K. Aggarwal, P. Patidar, C. Patki // IEEE Trans. on Energy Conver. – 2010. – Vol. 25. – No. 1. – P. 228-236.
- 47. Ahamed E. Z. Aero-design analysis for modified Darrieus based-straight bladed vawt systems / E. Z. Ahamed, A. R. Gowtham Ram // Int. Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 4. – No. 5. – P. 510-514.
- Aissaoui G. A. A Fuzzy-PI control to extract an optimal power from wind turbine / A. G. Aissaoui, A. Tahour, N. Essounbouli, F. Nollet, M. Abid, M. I. Chergui // Energy Conversion and Management. – 2013. – Vol. 65. – P. 688-696.
- Akello P. O. Performance analysis of a direct drive permanent magnet generator for small wind energy applications / P. O. Akello, F. X. Ochieng, J. N. Kamau // Journal of Sustainable Research in Engineering. – 2014. – Vol. 1. – No. 3 – P. 1-9.
- 50. Akwa J. V. A review on the performance of Savonius wind turbines / J. V. Akwa,
 H. A. Vielmob, A. P. Petry // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012.
 Vol. 16. P. 3054-3064.
- Alaimo A. 3D CFD analysis of a vertical axis wind turbine / A. Alaimo,
 A. Esposito, A. Messineo, C. Orlando, D. Tumino // Energies. 2015. Vol. 8. –
 P. 3013-3033.
- Anderson J. D. Fundamentals of Aerodynamics, Fifth edition / J. D. Anderson. New York: McGraw-Hill, 2011. – 1131 p.
- Andriollo M. Control strategies for a VAWT driven PM synchronous generator / M. Andriollo, M. De Bortoli, G. Martinelli, A. Morini, A. Tortella // Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM. – 2008. – P. 804-809.

- Ayhan D. A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model / D. Ayhan, S. Saglam // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16. – P. 1040-1049.
- 55. Baoqing Xu. The application of numerical simulation in the output power of concentrated wind energy turbine set / Xu. Baoqing, De Tian, Han Qiaoli // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 31. – P. 823-827.
- 56. Barlas T. K. Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines / T. K. Barlas, G. A. Kuik // Progress in Aerospace Sciences. 2010. Nº 46. P. 1-27.
- 57. Baroudi J. A. A review of power converter topologies for wind generators / J. A. Baroudi, V. Dinavahi, A. M. Knight // Renewable Energy. 2007. Vol. 32. P. 2369-2385.
- Beltran B. Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems / B. Beltran, T. Ahmed-Ali, M. Benbouzid // IEEE Trans. on Energy Conver. – 2008. – Vol. 23. – No. 2. – P. 943-948.
- Bhutta M. Vertical axis wind turbine a review of various configurations and design techniques / M. Bhutta, N. Hayat, A. Farooq, Z. Ali, S. Jamil, Z. Hussain // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – No. 16. – P. 1926-1939.
- Bianchi F. D. Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design / F. D. Bianchi, H. D. Battista, R. J. Mantz. – London: Springer, 2007. – 206 p.
- Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives / B. K. Bose. Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.
- Boukhezzar B. Nonlinear control of variable speed wind turbines without wind speed measurement / B. Boukhezzar, H. Siguerdidjane // Proc. 44th IEEE Conf. on Decision and Control, 12-15 December 2005, Spain. – P. 3456-3461.
- 63. Bystryk J. Small wind turbine power control in intermittent wind gusts / J. Bystryk,
 P. E.Sullivan // Jornal Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2011. Vol. 99. P. 624-637.

- 64. Cardenas R. Control of a switched reluctance generator for variable-speed wind energy applications / R. Cardenas, R. Pena, M. Perez, J. Clare, G. Asher, P. Wheeler // IEEE Trans. on Energy Conver. 2005. Vol. 20. No. 4. P. 781-791.
- 65. Carta J. A. A continuous bivariate model for wind power density and wind turbine energy output estimations / J. A. Carta, D. Mentado // Energy Conversion and Management. – 2007. – Vol. 48. – P. 420-432.
- 66. Chang T.-P. Comparative analysis on power curve models of wind turbine generator in estimating capacity factor / T.-P. Chang, F.-J. Liu, H.-H. Ko, S.-P. Cheng, L.-C. Sun, S.-C. Kuo // Energy. – 2014. – Vol. 73. – P. 88-95.
- 67. Changliang, X. Input–output feedback linearization and speed control of a surface permanent-magnet synchronous wind generator with the boost-chopper converter / X. Changliang, G. Qiang, G. Xin, S. Tingna, S. Zhanfeng // IEEE Trans. on Ind. Electron. 2012. Vol. 59. No. 9. P. 3489-3500.
- Chen Z. A Review of the state of the art of power electronics for wind turbines / Z.
 Chen, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg // IEEE Trans. on Power Electron. 2009. –
 Vol. 24. No. 8. P. 1859-1875.
- Cheng M. The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review / M. Cheng, Y. Zhu // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 88. – P. 332-347.
- 70. Chiarelli M. A new configuration of vertical axis wind turbine: an overview on efficiency and dynamic behavior / M. Chiarelli, A. Massai, D. Atzeni, F. Bianco // Journal of Energy Challenges and Mechanics. 2015. Vol. 45. No. 1. P. 1-6.
- 71. Chiarelli M. A new configuration of vertical axis wind turbine: an overview on efficiency and dynamic behavior / M. Chiarelli, A. Massai, D. Atzeni, F. Bianco // Journal of Energy Challenges and Mechanics. 2015. Vol. 45. No. 1. P. 1-6.
- Chong W. The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane / W. Chong, A. Fazlizan, S. Poh, K. Pan, W. Hew, F. Hsiao // Applied Energy. 2013. Vol. 112. P. 601-609.

- Clague P. A Novel design of Savonius wind turbine water heatig in residental settings / P. Clague, T. Z. Qi // 15th Int. Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP08), 2-4 Dec. 2008, Auckland, New-Zealand. – P. 259-262.
- 74. Czuczman J. Generatory synchroniczne dla autonomicznych bezprzekładniowych elektrowni wiatrowych / J. Czuczman, M. Czerepanjak, I. Sczur, P. Golubowski // Maszyny Elektryczny. Zeszyty Problemowe. – 2005. – No. 71. – S. 78-81.
- 75. da Silva Melo R. R. Integral analysis of rotors of a wind generator / R. R. da Silva Melo, A. da Silveira Neto // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16. P. 4809-4817.
- Debashisha J. A review of estimation of effective wind speed based control of wind turbines / J. Debashisha, R. Saravanakumar // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 43. – P. 1046-1062.
- 77. Diaz-Gonzalez F. A review of energy storage technologies for wind power applications / F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmun, R. Villafafila-Robles // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16. P. 2154–2171.
- 78. Eisenhut C. Wind-turbine model for system simulations near cut-in wind speed / C. Eisenhut, F. Krug // IEEE Trans. on Energy Conversion. 2007. Vol. 22. No. 2. P. 414-420.
- Eltamaly A. M. Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control / A. M. Eltamaly, H. M. Farh // Electric Power Systems Research. – 2013. – Vol. 97. – P. 144-150.
- Eriksson S. Tip speed ratio control of a 200 kW VAWT with synchronous generator and variable DC voltage / S. Eriksson, J. Kjellin, H. Bernhoff // Energy Science and Engineering. 2013. Vol. 1(3). P. 135-143.
- Fan Y. A new three-phase doubly salient permanent magnet machine for wind power generation / Y. Fan, K. Chau, M. Cheng // IEEE Trans. on Ind. Appl. – 2006. – Vol. 42. – No. 1. – P. 53-60.

- Femia N. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method / N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli // IEEE Trans. on Power Electron. – 2005. – Vol. 20. – No. 4. – P. 963-973.
- Fitzgerald N. Integrating wind power using intelligent electric water heating / N. Fitzgerald, A. M. Foley, E. McKeogh // Energy. – 2012. – Vol. 48. – P. 135-143.
- 84. Galdi V. Exploiting maximum energy from variable speed wind power generation systems by using an adaptive Takagi–Sugeno–Kang fuzzy model / V. Galdi, A. Piccolo, P. Siano // Energy Conversion and Management. 2009. Vol. 50. P. 413-421.
- Gao D. An integrated energy storage system based on hydrogen storage: Process configuration and case studies with wind power / D. Gao, D. Jiang, P. Liu, Z. Li, S. Hu, H. Xu // Energy. 2014. Vol. 66. P. 332-341.
- 86. Gonzalez L. G. Maximum-power-point tracking with reduced mechanical stress applied to wind-energy-conversion-systems / L. G. Gonzalez, E. Figueres, G. Garcera, O. Carranza // Applied Energy. 2010. Vol. 87. P. 2304-2312.
- Goude A. Aerodynamic and electrical evaluation of a VAWT farm control system with passive rectifiers and mutual DC-bus / A. Goude, F. Bülow // Renewable Energy. – 2013. – No. 60. – P. 284-292.
- Goude A. Robust VAWT control system evaluation by coupled aerodynamic and electrical simulations / A. Goude, F. Bülow // Renewable Energy. – 2013. – Vol. 59. – P. 193-201.
- 89. Grant A. Urban wind energy conversion: The potential of ducted turbines / A. Grant, C. Johnstone, N. Kelly // Renewable Energy. 2008. № 33. P. 1157-1163.
- 90. Gupta A. Modeling and simulation of doubly fed induction generator coupled with wind turbine-an overview / A. Gupta, S. N. Singh, D. K. Khatod // Journal of Engineering, Computers and Applied Sciences. – 2013. – Vol. 2. – No. 8. – P. 45-54.

- 91. Habtamu B. Double multiple stream tube model and numerical analysis of vertical axis wind turbine / B. Habtamu, Y. Yingxue // Energy and Power Engineering. 2011. Vol. 3. P. 262-270.
- 92. Haque E. Novel control strategy for a variable-speed wind turbine with a permanent-magnet synchronous generator / E. Haque, M. Negnevitsky, K. M. Muttaqi // IEEE Trans. on Ind. Appl. 2010. Vol. 46. No. 1. P. 331-339.
- 93. Harald G. Svendsen. Control system for start-up and shut-down of a floating vertical axis wind turbine / Harald G. Svendsen, Karl O. Merz // Energy Procedia. - 2013. - Vol. 35. - P. 33-42.
- 94. Harrison R. Large Wind Turbines: Design and Economics / R. Harrison,E. Hau, H. Snel // Chichester: Wiley, 2000.
- 95. Haruni A. M. O. Control of a direct drive IPM synchronous generator based on variable speed wind turbine with energy storage / A. M. O. Haruni, M. E. Haque, A. Gargoom, M. Negnevitsky // University of Tasmania, Hobart, Australia, TAS7001. 2010. P. 457-463.
- 96. Hedegaard K. Wind power integration using individual heat pumps Analysis of different heat storage options / K. Hedegaard, B. Vad Mathiesen, H. Lund, P. Heiselberg // Energy. – 2012. – Vol. 47. – P. 284-293.
- 97. Helle L. Wind turbine systems / L. Helle, F. Blaabjerg // Control in Power Electronics. – Academic Press, 2002. – P. 483-510.
- Herbert G. M. J. A review of wind energy technologies / G. M. J. Herbert, S. Iniyan, E. Sreevalsan, S. Rajapandian // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2007. - Vol. 11. - P. 1117-1145.
- 99. Hong Ying-Yi. MPPT for PM wind generator using gradient approximation / Y.-Y. Hong, S.-D. Lu, C.-S. Chiou // Energy Conversion and Management. – 2009. – Vol. 50. – P. 82-89.

- 100. Hossain A. Energy efficient wind turbine system based on fuzzy control approach /
 A. Hossain, R. Singh, I. A. Choudhury, A. Bakar // Procedia Engineering. 2013.
 Vol. 56. P. 637-642.
- 101. Hsieh W. C. Experimental study on performance of vertical axis wind turbine with NACA 4-digital series of blades / W. C. Hsieh, J. M. Miao, C. C. Lai, C. S. Tai // Advanced Materials Research. – 2012. – № 1. – P. 1055-1061.
- 102. Islam M. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines / M. Islam, D. Ting, A. Fartaj // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2008. – Vol. 12. – P. 1087-1109.
- 103. Ismail E. Single-switch 3φ PWM low harmonic rectifiers / E. Ismail, R. Erickson // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 1996. – Vol. 11. – No. 2. – P. 338-346.
- 104. Jamieson P. Innovation in Wind Turbine Design / P. Jamieson // John Wiley & Sons, 2011. – 289 p.
- 105. Jiang J. Aerodynamic performance of a double-H type vertical-axis wind turbine: designed by a stream-tube and CFD method / J. Jiang, X. Zheng, L. Zhang, Z. Li, L. He // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 346. – P. 90-95.
- 106. Jin Jiang. Aerodynamic Performance of a double-H type vertical-axis wind turbine: designed by a stream-tube and CFD method / J. Jiang, X. Zheng, L. Zhang, Z. Li, L. He // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 346. – P. 90-95.
- 107. Katawaluwa M., Zhang H., Vagapov Y., Evans J. Simulation of Wind Heat Generator. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://core.ac.uk/download/pdf/20486622.pdf.
- 108. Kazmi S. M. R. A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems / S. M. R. Kazmi, H. Goto, H.-J. Guo, O. Ichinokura // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 2011. – Vol. 58. – No. 1. – P. 29-36.
- 109. Kelvin T. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors / T. Kelvin, I. Syed // IEEE Trans. on Energy Conver. – 2004. – Vol. 19. – No. 2. – P. 392-399.

- 110. Klumpner C. A power electronic controlled dump load with negligible harmonics for accurate loading used in testing small wind turbines / C. Klumpner, B. Al, D. Hann // University of Nottingham, NG7 2RD. 2010. P. 596-601.
- 111. Kortabarria I. A novel adaptative maximum power point tracking algorithm for small wind turbines / I. Kortabarria, J. Andreu, I. M. de Alegría, J. Jiménez, J. I. Gárate, E. Robles // Renewable Energy. 2014. Vol. 63. P. 785-796.
- 112. Kot R. Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine / R. Kot, M. Rolak, M. Malinowski // Mathematics and Computers in Simulation. – 2013. – Vol. 91. – P. 29-40.
- 113. Koutroulis E. Design of a maximum power tracking system for wind-energyconversion applications / E. Koutroulis, K. Kalaitzaki // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 2006. – Vol. 53. – No. 2. – P. 486-494.
- 114. Krause P. C. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems / P. C. Krause,O. Wasynczuk, S. Sudhoff // IEEE PRESS, Wiley Interscience. 2002. 610 p.
- 115. Kubo K. Intelligent wind turbine unit with tandem rotors (discussion of prototype performances in field tests) / K. Kubo, Y. Hano, H. Mitarai // Current Applied Physics. 2010. № 10. P. 326-331.
- 116. Lari H. A. Analysis and design of a permanent-magnet outer-rotor synchronous generator for a direct-drive vertical-axis wind turbine / H. A. Lari, A. Kiyoumarsi, B. M. Dehkordi, A. Darijani, S. M. Madani // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. 2008. Vol. 10. No. 4 P. 324-332.
- 117. Lee C.-Y. Maximum power point tracking (MPPT) system of small wind power generator using RBFNN approach / C.-Y. Lee, P.-H. Chen, Y.-X. Shen // Expert Systems with Applications. – 2011. – Vol. 38. – P. 12058-12065.
- 118. Lee S. Effects of design parameters on aerodynamic performance of a counterrotating wind turbine / S. Lee, H. Kim, E. Son, S. Lee // Renewable Energy. – 2012. – № 42. – P. 140-144.
- 119. Li S. Numerical study on the performance effect of solidity on the straight-bladed vertical axis wind turbine / S. Li, Y. Li, M. Leijon // Power and Energy

Engineering Conference (APPEEC). – 28-31 March, 2010, Chengdu, China. – 2010. – P. 1-4.

- 120. Lin W.-M. Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system / W.-M. Lin, C.-M. Hong // Energy. – 2010. – Vol. 35. – P. 2440-2447.
- 121. Liu C. Design of a new outer-rotor permanent magnet hybrid machine for wind power generation / C. Liu, K. Chau, J. Jiang, L. Jian // IEEE Trans. on Magnets. – 2008. – Vol. 44. – No. 6. – P. 1494-1497.
- 122. Liu X. Optimization of a combined heat and power system with wind turbines /
 X. Liu // Electrical Power and Energy Systems. 2012. Vol. 43. P. 1421-1426.
- 123. Makarchuk O. The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine / O. Makarchuk, A. Rusek, I. Shchur, V. Shchur // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2015. – No. 1. – P. 179-182.
- 124. Marchenko O. V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia / O. V. Marchenko, S. V. Solomin // Renewable Energy. – 2004. – Vol. 29. – P. 1793-1809.
- 125. Marimoto, S. Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG / S. Marimoto, H. Nakayama, M. Sanada // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 2005. – Vol. 41. – No. 1. – P. 60-67.
- 126. Masmoudi A. Voltage control of a variable speed wind turbine connected to an isolated load: Experimental study / A. Masmoudi, K. Lotfi, O. Abderrazak // Energy Conversion and Management. – 2012. – Vol. 59. – P. 19-26.
- 127. MATLAB&Toolboxes. Проектирование систем управления \ Fuzzy Logic Toolbox. Штовба С. Д. «Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику». [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/.
- 128. Melício R. Power converter topologies for wind energy conversion systems: Integrated modeling, control strategy and performance simulation / R. Melício,

V. M. F. Mendes, J. P. S. Catalão // Renewable Energy. – 2010. – Vol. 35. – P. 2165-2174.

- 129. Mirecki A. Architecture complexity and energy efficiency of small wind turbines / A. Mirecki, X. Roboam, F. Richardeau // IEEE Trans. On Ind. Electr. 2007. Vol. 54. No.1. P. 660-669.
- Młodzikowski P. Analiza pracy małej elektrowni wiatrowej praca autonomiczna oraz przy podłączeniu do sieci elektoenergetycznej / P. Młodzikowski, A. Milczarek, M. Malinowski // Politechnika Warszawska. Prace Instytutu Elektrotechniki. – 2011. – Zeszyt 249. – S. 167-179.
- 131. Modifications of VAWTs Types of Vawts. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <u>https://www.google.com/search</u>? newwindow=1&biw=1280&bih=685&tbm=isch&sa=1&q=modifications+of+VA WT&oq=modifications+of+VAWT&gs_l=img.
- 132. Mohamed M. H. Aero-acoustics noise evaluation of H-rotor Darrieus wind turbines / M. H. Mohamed // Energy. – 2014. – Vol. 65. – P. 596-604.
- 133. Mohamed M. H. Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance / M. H. Mohamed // Energy. – 2013. – Vol. 57. – P. 495-594.
- 134. Muteanu I. Optimal Control of Wind Energy Systems / I. Muteanu, A. I. Bratcu,
 N. A. Cutululis, E. Ceangă. London: Springer, 2008. 284 p.
- 135. NACA profile coordinates Airfoil tools. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <u>http://airfoiltools</u>.com/airfoil/details?airfoil=naca0018.
- 136. Nasiri M. Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based wind turbines / M. Nasiri, J. Milimonfared, S. H. Fathi // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 86. – P. 892-900.
- 137. Neammanee B. Development of a wind turbine simulator for wind generator testing / B. Neammanee, S. Sirisumrannukul, S. Chatratana // Internatoinal energy journal. – 2007. – No. 8. – P. 21-28.
- 138. Nichita C. Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators / C. Nichita, D. Luca, B. Dayko, E. Ceanga // IEEE Trans. on Energy Conver. – 2002. – Vol. 17. – No. 4. – P. 523-529.
- 139. No T. S. Modeling, control, and simulation of dual rotor wind turbine generator system / T. S. No, J. E. Kim, J. H. Moon, S. J. Kim // Renewable Energy. 2009. № 34. P. 2124-2132.
- 140. Oliveira Jr. D. S. A DCM three-phase high frequency semi-controlled rectifier feasible for low power WECS based on a permanent magnet generator / D. S. Oliveira Jr., L. H. S. C. Barreto, F. L. M. Antunes, M. I. B. V. Silva, D. L. Queiroz, A. R. Rangel // Federal University of Ceara, Brasil. 2009. P. 1193-1199.
- 141. Pan C.-T. A novel sensorless MPPT / C.-T. Pan, Y.-L. Juan // IEEE Trans. On Energy Conver. 2010. Vol. 25. No. 1. P. 207-216.
- 142. Patel K. A review about the straight-bladed vertical axis wind turbine (SB-vawt) and its performance / K. Patel, Y. Sarthi, A. Tirkey, P. K. Sen // Int. Journal for Innovative Research in Science and Technology. 2014. Vol. 1. No. 6. P. 46-51.
- 143. Polinder H. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines / H. Polinder, F. A. Frank van der Pijl, G.-J. de Vilder, P. J. Tavner // IEEE Trans. on Energy Conver. 2006. Vol. 21. No. 3.
- 144. Pope K. Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine / K. Pope, V. Rodrigues, R. Doyle, A. Tsopelas, R. Gravelsins, G. F. Naterer, E. Tsang // Renewable Energy. 2010. Vol. 35. P. 1043-1051.
- 145. Pourrajabian A. Effect of air density on the performance of a small wind turbine blade: A case study in Iran / A. Pourrajabian, M. Mirzaei, R. Ebrahimi, D. Wood // J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn. 2014. Vol. 126. P. 1-10.
- 146. Prasad A. R. An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers / A. R. Prasad, P. D. Ziogas, S. Manias // IEEE Trans. on Power Elektron. - 1991. - Vol. 6. - No 1. - P. 83-92.

- 147. Rassoulinejad-Mousavi S. M. Experimental study of a combined three bucket H-rotor with savonius wind turbine / S. M. Rassoulinejad-Mousavi, M. Jamil, M. Layeghi // World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 28. No. 2. P. 205-211.
- 148. Renewables 2014 Global Status Report REN 21. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <u>http://www.ren21.net</u> /Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res. pdf.
- 149. Renewables 2014 Global Status Report REN 21. [Електронний ресурс] –Режимдоступудоресурсу:http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%2Oreport_low%20res.pdf.
- 150. Roy S. Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine / S. Roy, U. K. Saha // Applied Energy. – 2015. – Vol. 137. – P. 117-125.
- 151. Rus L. F. Experimental study on the increase of the efficiency of vertical axis wind turbines by equipping them with wind concentrators / L. F. Rus // Journal of Sustainable Energy. – 2012. – Vol. 3. – No. 1. – P. 30-35.
- 152. Sareni B. Model simplification and optimization of a passive wind turbine generator / B. Sareni, A. Abdelli, X. Roboam, D. H. Tran // Renewable Energy. – 2009. – Vol. 34 – P. 2640-2650.
- 153. Sateikis I. Analysis of feasibility on heating single family houses in rural areas by using sun and wind energy / I. Sateikis, S. Lynikiene, B. Kavolelis // Energy and Buildings. – 2006. – Vol. 38. – P. 695-700.
- 154. Serban I. A sensorless control method for variable-speed small wind turbines /
 I. Serban, C. Marinescu // Renewable Energy. 2012. Vol. 43. P. 256-266.
- 155. Sharma K. K. Performance measurement of a three-bladed combined darrieus / K. K. Sharma, A. Biswas, R. Gupta // Int. Journal of Renewable Energy Research. 2013. Vol. 3. No. 4. P. 885-891.

- 156. Shchur I. Analysis of methods of electrical load of permanent magnet synchronous generator for small wind turbines / I. Shchur, A. Rusek, V. Klymko, A. Gastołek, J. Sosnowski // Maszyny Elektryczny. Zeszyty Problemowe. 2015. No. 105/1. S. 75-81.
- 157. Shchur I. Estimation of electromagnetic compatibility and efficiency of the adjustable load systems of PMSG in wind turbines / I. Shchur // Przegląd Elektrotechniczny. – 2011. – No 1. – P. 85-90.
- 158. Silva C. E. A. Three-phase power factor correction rectifirer applied to wind energy conversion systems / E. A. C. Silva, R. T. Bascopé, D. S. Oliveira Jr. // Federal University of Ceara, Brasil. – 2008. – P. 768-773.
- 159. Simic Z. Small wind turbines a unique segment of the wind power market / Z. Simic, J. Havelka, M. Vrhovcak // Renewable Energy. 2014. No. 50. P. 1027-1036.
- 160. Simoes M. G. Design and performance evaluation of a fuzzy-logic-based variablespeed wind generation system / M. G. Simoes, B. K. Bose, R. J. Spiegel // IEEE Trans. On Ind. Appl. – 1997. – Vol. 33. – No. 4. – P. 956-965.
- 161. Simoes M. G. Fuzzy logic based intelligent control of a variable speed cage machine wind generation system / M. G. Simoes, B. K. Bose, R. J. Spiegel // IEEE Trans. on Power Electron. – 1997. – Vol. 12. – No. 1. – P. 87-95.
- 162. Sineglazov V. M. Substantiation of adaptive self-adjusting system of autonomous wind energy turbine / V. M. Sineglazov, V. V. Kozyrskyy, M. I. Trehub, O. S. Vasilenko // Electronics and Control Systems. 2015. №2(44). P. 62-68.
- 163. Siota T. Matching between straight-wing nonarticulated vertical axis wind turbine and a new wind turbine generator / T. Siota, T. Isaka, T. Sano, K. Seki // Electrical Engineering in Japan. – 2011. – Vol. 174. – No. 2. – P. 1350-1358.
- 164. Staelens Y. A Straight-bladed variable-pitch VAWT concept for improved power generation / Y. Staelens, F. Saeed, I. Paraschivoiu // ASME 2003, Wind Energy Symposium. – 2003. – P. 146-154.

- 165. Stiebler M. Wind Energy Systems for Electric Power Generation / M. Stiebler. London: Springer, 2008. – 189 p.
- 166. Sung N. J. Aerodynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotating wind turbine system / N. J. Sung, T. S. No, K. W. Ryu // Renewable Energy. – 2005. – № 30. – P. 631-644.
- 167. Technical Manual WP130 MK II Controller. Version 3.0 Mita-Teknik, 2014. –
 60 p.
- 168. The Free Encyclopedia Wikipedia. (2014), «Density of air». [Електронний pecypc] Режим доступу до ресурсу: http://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air.
- 169. Tjiu W. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I:Assessment of Darrieus VAWT configurations / W. Tjiu Willy, T. Marnoto, S. Mat, H.-R. Mohd, S. Kamaruzzaman // Renewable Energy. – 2015. – Vol. 75. – P. 50-67.
- 170. Toja-Silva F. Urban wind energy exploitation systems: Behaviour under multidirectional flow conditions Opportunities and challenges / F. Toja-Silva, A. Colmenar-Santos, M. Castro-Gil // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 24. P. 364-378.
- 171. Trapp J. G. Variable speed wind turbine using the squirrel cage induction generator with reduced converter power rating for stand-alone energy systems / J. G. Trapp, F. A. Farret, F. T. Fernandes, L. C. Correa // 10th Int. Conf. on Industry Applications, 5-7 November 2012, Fortaleza, Brazil. 2012. P. 1-8.
- 172. Twidell, J. W. A solar/wind heated house and a small island community, Orknej, Scotland / J. W. Twidell, K. Woodbridge, D. Barbour, A. Dtepek, I. Robertson // Solar and Wind Technology. – 1990. – Vol. 7. – No. 1. – P. 55-62.
- 173. Wang H. Control and interfacing of a grid-connected small-scale wind turbine generator / H. Wang, C. Nayar, J. Su, M. Ding // IEEE Trans. on Energy Conver. – 2011. – Vol. 26. – No. 2. – P. 428-434.

- 174. Wang Q. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems / Q. Wang, L. Chang // IEEE Trans. on Power Electronics. – 2006. – Vol. 19. – No. 5. – P. 1242-1249.
- 175. Xiandong M. Generic model of a community-based microgrid integrating windturbines, photovoltaics and CHP generations / M. Xiandong, W. Yifei, Q. Jianrong // Applied Energy. 2013. Vol. 112. P. 1475-1482.
- 176. Yamada T. Overspeed control of a variable-pitch vertical-axis wind turbine by means of tail vanes / T. Yamada, T. Kiwata, T. Kita, M. Hirai, N. Komatsu, T. Kono // Journal of Environmentand Engineering. 2012. Vol. 7. No. 1. P. 39-52.
- 177. Yulong Y. Integrated electricity and heating load control based on smart grid technology / Y. Yulong, L. Hongyu, W. Kai, Y. Xu, X. Shuang // 2012 China Int. Conf. on Electricity Distribution (CICED 2012), Shanghai, 5-6 Sep. 2012. – Paper No CP0329. – 5 p.
- 178. Zhiwei Y. Thermodynamic analysis of a hybrid thermal-compressed air energy storage system for the integration of wind power / Y. Zhiwei, W. Zhe, R. Peng, L. Zheng, Ni Weidou // Applied Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 66. – P. 519-527.

додатки

ДОДАТОК А

Програма в середовищі Mathcad для математичного моделювання часової залежності швидкості турбулентного вітропотоку



Savr1 := $\frac{Sw(0.0001) + Sw(0.0005)}{2}$ Savr1 = 578.719 Savr2 := $\frac{Sw(0.0005) + Sw(0.001)}{2}$ Savr2 = 498.195 Savr3 := $\frac{Sw(0.001) + Sw(0.002)}{2}$ Savr3 = 402.148 Savr4 := $\frac{Sw(0.002) + Sw(0.003)}{2}$ Savr4 = 309.037Savr5 := $\frac{Sw(0.003) + Sw(0.005)}{2}$ Savr5 = 227.529 Savr6 := $\frac{Sw(0.005) + Sw(0.01)}{2}$ Savr6 = 136.564 $Savr7 := \frac{Sw(0.01) + Sw(0.02)}{2}$ Savr7 = 63.82Savr8 := $\frac{Sw(0.02) + Sw(0.05)}{2}$ Savr8 = 23.689 Savr9 := $\frac{Sw(0.1) + Sw(0.05)}{2}$ Savr9 = 6.604

$$f_{0} := \frac{\left(\frac{\sigma^{2} \cdot X_{L}}{\text{Savr1} \cdot \text{Vser}}\right)^{\frac{3}{5}} - 1}{1.5 \cdot \frac{X_{L}}{\text{Vser}}} \qquad f_{0} = 2.888 \times 10^{-4} \qquad f_{1} := \frac{\left(\frac{\sigma^{2} \cdot X_{L}}{\text{Savr2} \cdot \text{Vser}}\right)^{\frac{3}{5}} - 1}{1.5 \cdot \frac{X_{L}}{\text{Vser}}} \qquad f_{1} = 7.34 \times 10^{-4}$$

$$A_{0} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \text{Savr1} \cdot \Delta f_{1}} \qquad A_{0} = 0.34 \qquad A_{1} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \text{Savr2} \cdot \Delta f_{2}} \qquad A_{1} = 0.353$$

$$f_{2} := \frac{\left(\frac{\sigma^{2} \cdot X_{L}}{Savr3 \cdot Vser}\right)^{\frac{3}{5}} - 1}{1.5 \cdot \frac{X_{L}}{Vser}} \qquad f_{2} = 1.444 \times 10^{-3} \qquad f_{3} := \frac{\left(\frac{\sigma^{2} \cdot X_{L}}{Savr4 \cdot Vser}\right)^{\frac{3}{5}} - 1}{1.5 \cdot \frac{X_{L}}{Vser}} \qquad f_{3} = 2.452 \times 10^{-3}$$

$$A_{2} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot Savr3 \cdot \Delta f_{3}} \qquad A_{2} = 0.448 \qquad A_{3} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot Savr4 \cdot \Delta f_{4}} \qquad A_{3} = 0.393$$

$$f_{4} := \frac{\left(\frac{\sigma^{2} \cdot X_{L}}{\text{Savr5} \cdot \text{Vser}}\right)^{\frac{3}{5}} - 1}{1.5 \cdot \frac{X_{L}}{\text{Vser}}} \qquad f_{4} = 3.843 \times 10^{-3} \qquad f_{5} := \frac{\left(\frac{\sigma^{2} \cdot X_{L}}{\text{Savr6} \cdot \text{Vser}}\right)^{\frac{3}{5}} - 1}{1.5 \cdot \frac{X_{L}}{\text{Vser}}} \qquad f_{5} = 6.813 \times 10^{-3}$$

$$A_{4} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \text{Savr5} \cdot \Delta f_{5}} \qquad A_{4} = 0.477 \qquad A_{5} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \text{Savr6} \cdot \Delta f_{6}} \qquad A_{5} = 0.584$$

$$f_{6} := \frac{\left(\frac{\sigma^{2} \cdot X_{L}}{Savr7 \cdot Vser}\right)^{\frac{3}{5}} - 1}{1.5 \cdot \frac{X_{L}}{Vser}} \qquad f_{6} = 0.013 \qquad f_{7} := \frac{\left(\frac{\sigma^{2} \cdot X_{L}}{Savr8 \cdot Vser}\right)^{\frac{3}{5}} - 1}{1.5 \cdot \frac{X_{L}}{Vser}} \qquad f_{7} = 0.028$$

$$A_{6} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot Savr7 \cdot \Delta f_{7}} \qquad A_{6} = 0.565 \qquad A_{7} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot Savr8 \cdot \Delta f_{8}} \qquad A_{7} = 0.596$$



ДОДАТОК Б

Програма в середовищі Mathcad для математичного моделювання електромеханічних процесів при періодичному навантаженні ВР

PMSG parameters

$$R_n := 1.8$$
 $\eta_G := \frac{R_n}{R_n + R_a}$ $\eta_G = 0.923$

 $\lambda := 0.5, 0.6..10$

$$C_{p}(\lambda) \coloneqq 1.14 \cdot \left(\frac{9.47}{\lambda} - 1\right) \cdot exp\left(\frac{-6}{\lambda}\right) \qquad C_{m}(\lambda) \coloneqq \frac{C_{p}(\lambda)}{\lambda}$$



 $\begin{array}{ll} \underset{max}{\text{NN}} \coloneqq 1000 & \text{i} \coloneqq 0..1000 & \text{T}_{\text{min}} \coloneqq 0 & \text{T}_{\text{max}} \coloneqq 20 \\ \\ \text{B} \coloneqq 0.5 \cdot \mu_{\text{i}} \cdot \frac{\text{A} \cdot \text{r}^2}{\text{J}} \cdot \text{V}_{\text{w}} & \underset{max}{\text{C}} \coloneqq \frac{\text{b}}{\text{J}} & \text{D} \coloneqq \frac{3}{2} \cdot \frac{\left(\text{p} \cdot \psi\right)^2}{\text{J}} \\ \\ \text{B} = 3.68 & \text{C} = 4.839 \times 10^{-3} & \text{D} = 0.24 \end{array}$

Without load $z := \lambda_{min}$

$$DiffEq(x,z) := \left[B \cdot \frac{1.14 \cdot \left(\frac{9.47}{z} - 1\right) \cdot exp\left(\frac{-6}{z}\right)}{z} - \left(C \cdot z + M_c \cdot \frac{r}{J \cdot V_w} \right) \right]$$

 $S1 := rkfixed(z, T_{min}, T_{max}, N, DiffEq)$

 $\text{With load} \qquad y:=\lambda_{max}$

$$\underbrace{\text{DiffEq}(x,y) := \left[B \cdot \frac{1.14 \cdot \left(\frac{9.47}{y} - 1\right) \cdot \exp\left(\frac{-6}{y}\right)}{y} - \left(C \cdot y + M_c \cdot \frac{r}{J \cdot V_w}\right) - D \cdot \frac{y}{\left[\left(R_a + R_n\right)^2 + \left(\frac{p \cdot V_w \cdot L}{r}\right)^2 \cdot y^2\right]^{0.5}} \cdot \cos\left(\operatorname{atan}\left(\frac{p \cdot V_w \cdot L}{R_a + R_n}\right)\right)\right] \\ \underbrace{\text{S}_{w} := rkfixed}(y, T_{min}, T_{max}, N, \text{DiffEq})$$

Tip speed ratio







 $\mathbf{P}_{\mathbf{i}} := \frac{3}{2} \cdot \left(\mathbf{i}\mathbf{a}_{\mathbf{i}}\right)^2 \cdot \mathbf{R}_{\mathbf{n}}$

Electrical power



ДОДАТОК В

Програма в середовищі Mathcad для математичного моделювання електромеханічних процесів при імпульсному низькочастотному керуванні

навантаженням СГПМ

WT parameters $V_{w} := 5$ $\rho := 1.23$ r := 3.69 $A_{w} := 27.25$ $J_{w} := 310$ Mc := 25 b := 1.5 $\lambda_{min} := 3.02$ $\lambda_{max} := 4.46$

PMSG parameters

Ra := 0.15 La := 0.002 p := 32 Fm := 0.22 Rx := 1.1 k := 10

n := 0.5, 0.55.. k

$$B(V,n,\omega) := 0.5 \rho \cdot A \cdot \left[\left[1.14 \left(\frac{9.47}{\frac{\omega \cdot r}{V}} - 1 \right) \right] \cdot e^{\frac{-6 \cdot V}{\omega \cdot r}} \right] \cdot V^3 - \left(Mc + b \cdot \omega \right) \cdot \omega - \frac{3 \cdot 0.5 \left(p \cdot Fm \cdot \omega \right)^2 \cdot \left(R + Ra \right)}{\left(R + Ra \right)^2 + \left(p \cdot \omega \cdot La \right)^2} \cdot \frac{n}{k} \cdot \frac{1}{k} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k} \right)^2} + \frac{1}{k} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k} \right)^2}{\left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k} \right)^2} \cdot \frac{1}{k} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k} \right)^2} + \frac{1}{k} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k} \right)^2}{\left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k} \right)^2} \cdot \frac{1}{k} \left(\frac$$

 $\omega := 15$

 $\omega 1(V,n) := root(B(V,n,\omega),\omega)$

$$Cp(V,n) := \left[1.14 \left(\frac{9.47}{\frac{\omega 1(V,n) \cdot r}{V}} - 1\right)\right] \cdot e^{\frac{-6 \cdot V}{\omega 1(V,n) \cdot r}}$$



ДОДАТОК Г

Математичне моделювання фізичних процесів різної природи, що мають місце в ЕПМЕТ

У роботі ЕПМЕТ поєднуються процеси різної фізичної природи: механічні, електричні, магнітні, теплові. Основні закономірності їхнього перебігу такі.

Г.1. Механічна частина, аналогічно до (2.14), описана рівнянням руху одномасової механічної системи:

$$M_{\rm BP} - M_{\rm c} - b\omega - M_{\rm T\Gamma} = J_{\Sigma} \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}, \qquad (\Gamma.1)$$

де $M_{T\Gamma}$ – електромагнітний гальмівний момент від теплового генератора – ЕПМЕТ, зумовлений генеруванням ним теплового потоку; J_{Σ} – сумарний момент інерції ВР, ротора СГПМ і ротора ЕПМЕТ.

Г.2. Електромагнітна частина. За другим законом Кірхгофа рівняння електричної рівноваги напруг в колі обмотки збудження ЕПМЕТ має вигляд:

$$U_{\rm DC} - I_{\rm f} R_{\rm f} - L_{\rm f} \frac{\mathrm{d}I_{\rm f}}{\mathrm{d}t} = 0, \qquad (\Gamma.2)$$

де $U_{\rm DC}$ – напруга на виході DC/DC перетворювача, що живить обмотку збудження ЕПМЕТ; $L_{\rm f}$ – індуктивність обмотки збудження ЕПМЕТ.

На підставі рівняння (Г.2) можна записати передатну функцію каналу регулювання збудження ЕПМЕТ у вигляді, показаному на рис. Г.1.



Рис. Г.1. Передатна функція індуктора ЕПМЕТ

Інерційністю перехідних електромагнітних процесів, які відбуваються в неферомагнітному роторі ЕПМЕТ, у порівнянні з електромагнітною інерційністю його обмотки збудження, можна знехтувати. Тоді функціональну залежність теплової потужності ЕПМЕТ (вона ж потужність на валу ВР) від струму збудження та кутової швидкості можна представити виразом, який описує залежності, показані на рис. 4.24:

$$P_{\rm T} = f(\omega, I_{\rm f}). \tag{\Gamma.3}$$

Виразові (Г.3) відповідає безінерційна нелінійна ланка (рис. Г.2).



Рис. Г.2. Передавальна функція електромагнітних процесів у роторі ЕПМЕТ

Г.З. Теплова частина. Диференційне рівняння, що описує процеси теплопередачі в теплоносії резервуару ЕПМЕТ, має вигляд

$$P_{\mathrm{T}} - P_{\mathrm{T-0}} - P_{\mathrm{T-0}} = C_{\Sigma} \frac{\mathrm{d}\theta_{\mathrm{T}}}{\mathrm{d}t}; \qquad (\Gamma.4)$$

де *P*_{т-о} – потужність теплових втрат (тепловий потік) з резервуара з теплоносієм ЕПМЕТ у навколишнє середовище;

*P*_{т-б} – потужність відводу теплоти від теплоносія з резервуара ЕПМЕТ у бойлер;

 C_{Σ} – сумарна теплоємність ротора ЕПМЕТ та теплоносія в резервуарі;

 $\theta_{\rm T}$ – температура теплоносія та ротора ЕПМЕТ (приймаємо однаковою).

Припустимо, що температура теплоносія в резервуарі ЕПМЕТ однакова по всьому об'єму, що матиме місце при його досить інтенсивному перемішуванні

при обертанні ротора. $P_{\text{т-o}}$, відповідно до закону Ньютона, прямо пропорційна різниці температур теплоносія та навколишнього середовища θ_{o} :

$$P_{\mathrm{T-O}} = k_{\mathrm{T-O}}(\theta_{\mathrm{T}} - \theta_{\mathrm{O}}), \qquad (\Gamma.5)$$

де $k_{\text{т-o}}$ – коефіцієнт теплопередачі від резервуара до зовнішнього середовища.

Сумарна теплоємність, яка визначає, скільки теплоти потрібно на нагрівання чи охолодження теплоносія та ротора ЕПМЕТ на 1 градус, рівна:

$$C_{\Sigma} = \sum_{i} c_{i} m_{i} = c_{T} m_{T} + c_{p} m_{p} , \qquad (\Gamma.6)$$

де $c_{\rm T}$ та $m_{\rm T}$ – питома теплоємність теплоносія та його маса в резервуарі;

 $c_{\rm p}$ та $m_{\rm p}-$ питома теплоємність ротора та його маса.

При ввімкненні помпи для перекачування теплоносія з резервуара ЕПМЕТ у бойлер тепловий потік прямо пропорційний до продуктивності помпи Q (м³/с) та різниці температур води в бойлері θ_6 й теплоносія в ЕПМЕТ θ_{T} :

$$P_{\mathrm{T-6}} = c_{\mathrm{T}} \rho_{\mathrm{T}} Q(\theta_{\mathrm{T}} - \theta_{\mathrm{6}}), \qquad (\Gamma.7)$$

де $\rho_{\rm T}$ – густина теплоносія.

Якщо знехтувати тепловтратами з резервуара, зважаючи на добру теплоізоляцію останнього, то під час роботи ЕПМЕТ температура теплоносія в резервуарі після закінчення його перекачування до бойлера зростатиме за законом, який отримуємо за допомогою розв'язку диференційного рівняння (Г.4):

$$\theta_{\mathrm{T}} = \frac{1}{C_{\Sigma}} \int P_{\mathrm{T}} \,\mathrm{d}t + \theta_{\mathrm{T},0}, \qquad (\Gamma.8)$$

де $\theta_{\text{т.0}}$ – температура теплоносія в резервуарі відразу після закінчення його перекачування до бойлера.

Г.4. Гідравлічна частина. Необхідно визначити, яким має бути об'єм резервуара та за який час помпа перекачає надлишкову кількість теплоти з резервуара до бойлера.

Оскільки потік відводу теплоти з резервуара під час перекачування теплоносія до бойлера значно перевищує потужність генерування теплоти ЕПМЕТ, а також потужність тепловтрат від резервуара, то, припустивши, що $P_{\rm T} = 0$ та $P_{\rm T-0} = 0$, рівняння (Г.4) з врахуванням (Г.7) матиме вигляд

$$C_{\Sigma} \frac{\mathrm{d}\theta_{\mathrm{T}}}{\mathrm{d}t} = c_{\mathrm{T}} \rho_{\mathrm{T}} Q(\theta_{\mathrm{f}} - \theta_{\mathrm{T}}). \qquad (\Gamma.9)$$

Лінійне диференціальне рівняння (Г.9) можна представити так:

$$T_{\rm B.T} \frac{\mathrm{d}\theta_{\rm T}}{\mathrm{d}t} + \theta_{\rm T} = \theta_{\rm S}, \qquad (\Gamma.10)$$

де $T_{\rm B.T} = \frac{C_{\Sigma}}{c_{\rm T} \rho_{\rm T} Q}$ – стала часу відбору теплоти від ЕПМЕТ.

Розв'язком лінійного диференційного рівняння (Г.10) є

$$\theta_{\rm T} = \theta_{\rm \tilde{o}} + (\theta_{\rm T,0} - \theta_{\rm b}) \exp\left(-\frac{t}{T_{\rm B,T}}\right),\tag{\Gamma.11}$$

де $\theta_{\rm T,0}$ – початкове значення температури теплоносія.

Для системи перекачування теплоти від резервуара ЕПМЕТ до бойлера доцільно вибрати простий спосіб двопозиційного керування: ввімкнення помпи відбуватиметься при перегріві теплоносія в резервуарі $\Delta \theta_{on}$, а вимкнення — при $\Delta \theta_{off}$ (перегрів теплоносія – різниця температур теплоносія в резервуарі ЕПМЕТ і в бойлері $\Delta \theta_{r-6} = \theta_r - \theta_6$). Оскільки об'єм бойлера значно більший від об'єму резервуара ЕПМЕТ, температуру теплоносія в бойлері за час перекачування вважатимемо незмінною.

Рівняння (Г.11) доцільно виразити через перегрів теплоносія у вигляді

$$\Delta \theta_{\rm T-6} = \Delta \theta_{\rm on} \exp\left(-\frac{t}{T_{\rm B.T}}\right). \tag{\Gamma.12}$$

Перекачування теплоносія закінчиться через час t_{π} , коли перегрів теплоносія досягне значення $\Delta \theta_{\text{off}}$:

$$\Delta \theta_{\rm off} = \Delta \theta_{\rm on} \exp\left(-\frac{t_{\rm m}}{T_{\rm B.T}}\right). \tag{\Gamma.13}$$

Рівняння (Г.12) і (Г.13) ілюструє рис. Г.3.



Рис. Г.З. Змінна температури теплоносія в резервуарі ЕПМЕТ за час роботи помпи

Час перекачування теплоносія прямо пропорційний масі теплоносія й обернено пропорційний продуктивності помпи, або з рівняння (Г.13)

$$t_{\rm II} = T_{\rm B.T} \ln \frac{\Delta \theta_{\rm on}}{\Delta \theta_{\rm off}}.$$
 (Γ.14)

Об'єм теплоносія, який перекачується від ЕПМЕТ до бойлера за один раз, рівний:

$$V_{\text{T}.\Pi} = Q t_{\Pi} = \frac{C_{\Sigma}}{c_{\text{T}} \rho_{\text{T}}} \ln \frac{\Delta \theta_{\text{on}}}{\Delta \theta_{\text{off}}}.$$
 (Γ.15)

Об'єм теплоносія в трубопроводі між резервуаром і бойлером рівний

$$V_{\rm rp} = \frac{\pi d_{\rm rp}^2}{4} l_{\rm rp} \,, \tag{\Gamma.16}$$

де $d_{\rm rp}$ та $l_{\rm rp}$ – діаметр і довжина трубопроводу.

Для ефективного використання генерованої ЕПМЕТ теплоти необхідно забезпечити, щоб об'єм теплоносія, який перекачується за один раз, перевищував об'єм трубопроводу більш, ніж у 5-7 разів: $V_{_{T,\Pi}} > (5 \div 7) V_{_{Tp}}$.

Підставляючи (Г.6) в рівняння (Г.15), можна визначити необхідний об'єм теплоносія в резервуарі ЕПМЕТ у такому вигляді:

$$V_{\text{T.p}} = \frac{m_{\text{T}}}{\rho_{\text{T}}} = V_{\text{T.f}} \left(\ln \frac{\Delta \theta_{\text{on}}}{\Delta \theta_{\text{off}}} \right)^{-1} - \frac{c_{\text{p}} m_{\text{p}}}{c_{\text{T}} \rho_{\text{T}}}.$$
 (Γ.17)

ДОДАТОК Д

Результати комп'ютерного симулювання роботи когенераційної автономної ВЕУ в зонах повної зарядженості та розрядженості АБ

Зона повної зарядженості АБ. Осцилограми основних координат і показників роботи ВЕУ показано на рис. Д.1 - Д.5. Симулювання тривало 45 с. На рис. Д.1 приведено осцилограми швидкості турбулентного вітру із середнім значенням – 6,8 м/с і відповідної кутової швидкості ВР.



Рис. Д.1. Часові залежності швидкості вітру Vw і кутової швидкості ВР w

Потужність споживання змінювалася в експерименті кожних 9 с, причому значення струму були такі ж: спочатку малі – 1 і 2 А, а потім великі – 40, 45 і 100 А (рис. Д.2). На інтервалі часу 7...18 с, коли настає повне заряджання АБ (SOC = 100%, рис. Д.3), генерування електроенергії припиняється (рис. Д.2), і навантаження ВР створює ЕПМЕТ (рис. Д.4, г, Д.5). Після зростання електричного споживання (18...36 с) струм навантаження розподіляється між АВН і АБ (рис. Д.2). При цьому АБ розряджається (рис. Д.3). В інтервалі часу 27...36 с струм розряджання АБ більший, ніж встановлене значення 10секундного перевантаження 30 А, про що сигналізує сигнал логічної «1» на рис. Д.4, б. Проте система продовжує генерування та постачання електроенергії аж до моменту часу 36 с, коли струм споживання зростає до 100 А і перевищує встановлене допустиме миттєве значення 60 А. У цей момент система відмикає електроспоживання (рис. Д.4, в) і АВН працює на заряджання АБ, оскільки величина SOC, при якій вмикається дозвіл на заряджання АБ, вибрана 99,8% для демонстрації роботи алгоритму.



Рис. Д.2. Часові залежності струмів: І AR – на виході ABH, І load – споживання, І AB – акумуляторної батареї



Рис. Д.З. Часова залежність ступеня зарядженості АБ





Рис. Д.4. Часові залежності логічних сигналів про стан системи: а) перезаряд АБ, б) перерозряд АБ, в) ввімкнення електричного споживання, г) ввімкнення теплового навантаження



Рис. Д.5. Часові залежності заданої Pzt і забезпеченої ЕПМЕТ Pt теплової потужності

За час експерименту $C_{\rm P}$ практично рівне максимальному значенню 0,351, а λ коливається біля оптимального значення 3,675 (рис. Д.6). Це свідчить про коректну роботу систем керування як на нижньому рівні, так і на верхньому в зоні повної зарядженості АБ.





Рис. Д.6. Часові залежності коефіцієнта відбору ВР потужності від вітру (а) та швидкохідності ВР (б)

Зона повної розрядженості АБ. Осцилограми основних координат і показників роботи ВЕУ показано на рис. Д.7 – Д.12. Симулювання тривало 50 с. На рис. Д.7 приведено осцилограми швидкості турбулентного вітру із середнім значенням – 6,0 м/с і відповідної кутової швидкості ВР.



Рис. Д.7. Часові залежності швидкості вітру Vw і кутової швидкості ВР w

Потужність споживання змінювалася в експерименті кожних 9 с, причому значення струму були такі ж: спочатку малі – 1 і 2 А, а потім великі – 40, 45 і 100 А (рис. Д.8). На інтервалі часу 1...18 с, за малої потужності споживання, відбувається заряджання АБ (рис. Д.9). Після зростання споживання з 18 с починається стрімке розряджання АБ аж до мінімально допустимого значення для свинцево-кислотних АБ (SOC = 50%), яке настає на 25 с (рис. Д.9). При цьому 10 - секундне перевантаження тривало лише в інтервалі 21,5...25 с (рис. Д.10, б).

Оскільки АБ повністю розряджена, а струм споживання високий, система керування відмикає електричне навантаження (рис. Д.10, в), АВН починає працювати лише на заряджання АБ (рис. Д.9, Д.10), а оптимальне навантаження ВР створює ЕПМЕТ (рис. Д.10, г, Д.11).



Рис. Д.8. Часові залежності струмів: І AR – на виході ABH, І load – споживання, І AB – акумуляторної батареї



Рис. Д.9. Часова залежність ступеня зарядженості АБ





Рис. Д.10. Часові залежності логічних сигналів про стан системи: а) перезаряд АБ, б) перерозряд АБ, в) ввімкнення електричного споживання, г) ввімкнення теплового навантаження



Рис. Д.11. Часові залежності заданої Pzt і забезпеченої ЕПМЕТ Pt теплової потужності

Як і в попередніх випадках, за час експерименту $C_{\rm P}$ практично рівне максимальному значенню 0,351, а λ коливається біля оптимального значення 3,675 (рис. Д.12). Це свідчить про коректну роботу систем керування як на нижньому рівні, так і на верхньому в зоні повної розрядженості АБ.





Рис. Д.12. Часові залежності коефіцієнта відбору ВР потужності від вітру (а) і швидкохідності ВР (б)

додаток е

Акти про використання результатів роботи



АКТ

про використания результатів дисертаційної роботи Щура Всеволода Ігоровича

на тему: «Енергоефективне керування вітроустановками малої потужності для генерування електричної і теплової енергії»

Науково-технічна комісія в складі:

Голова: заступник директора Інституту енергетики та систем керування д.т.н., доц. Матіко Ф.Д.

Члени: завідувач кафедри електроприводу та комп'ютеризованих електромеханічних систем (ЕПК) д.т.н., проф. Лозинський О.Ю., професор кафедри ЕПК д.т.н., проф. Маляр А.В., професор кафедри ЕПК, д.т.н., проф. Мороз В.І.

склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Щура В.І. впроваджені в навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка», зокрема:

1. Комбінований регулятор роботи вітроустановки (BEY) регулюванням за відхиленням кутової швидкості вітроротора від усталеного значення та регулюванням за збуренням швидкості вітру з адаптацією до метеорологічних умов роботи, реалізованою за принципом нечіткої логіки, 141 підготовці магістрів спеціальності використовується при у дисципліні електротехніка та електромеханіка» «Електроенергетика, «Комп'ютеризовані електромеханічні системи» (Тема 2. Основні принципи теорії цифрових систем керування).

2. Експериментальний лабораторний стенд з фізичним симулятором роботи вітроротора ВЕУ, блоком із синхронного генератора з постійними магнітами, теплового генератора та реалізованими в програмованому логічному контролері варіантами систем керування використовується при підготовці

магістрів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» у дисципліні «Автоматизація типових технологічних процесів» (Тема 5. Реалізація динамічних моделей реального часу на програмованих логічних контролерах).

3. Створені в середовищі MATLAB/Simulink моделі електротеплових систем ВЕУ використовуються для проведення досліджень магістрантами та аспірантами при виконанні магістерських кваліфікаційних робіт та дисертацій.

Голова

1

Члени:

lleur Ф. Д. Матіко Ю. Лозинський А. В. Маляр В. І. Мороз

17.02.2017 p.



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 Щура Всеволода Ігоровича

на тему: «Енергоефективне керування вітроустановками малої потужності для генерування електричної і теплової енергії»

Комісія інженерних питань ПП «ЕКО-СТ» у складі директора Станицького О.М. та заступника директора Крупника І. Р. склала цей акт про те, що наукові, отримані в дисертаційній роботі Щура В.І., використовуються в інженерній практиці ПП «ЕКО-СТ», яке займається розробленням та інсталяцією енергоустановок, в тому числі й з використанням поновлюваних джерел енергії.

У практичних роботах знайшли використання такі результати, що були отримані дисертантом:

- Методика обґрунтування раціональних параметрів систем періодичного навантаження та імпульсного низькочастотного навантаження синхронного генератора з постійними магнітами в елетротепловій ВЕУ.
- Алгоритм керування енергопотоками на вищому рівні керування ВЕУ, який забезпечує ефективне споживання генерованої ВЕУ електричної енергії, її накопичення в акумуляторних батареях, а також енергетичний менеджмент акумуляторних батарей.

Директор

О.М. Станицький 36609015 рупник

Заступник директора

10 лютого 2017 р.