

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

Щур Всеволод Ігорович

УДК 621.316.728:621.365.39:621.548.5

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ ВІТРОУСТАНОВКАМИ
МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ І
ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Лозинський Андрій Орестович,
директор Інституту енергетики та систем керування
Національного університету «Львівська політехніка»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Васько Петро Федосійович,
провідний науковий співробітник відділу
гідроенергетики Інституту відновлюваної енергетики
НАН України (м. Київ)

кандидат технічних наук, професор
Сиротюк Валерій Миколайович,
професор кафедри електротехнічних систем
Львівського національного аграрного університету

Захист відбудеться «02» червня 2017 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 гол. корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «27» квітня 2017 року.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доцент



В. І. Коруд

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Останнім часом щораз більшого поширення набувають малопотужні (до 10 кВт) вітроенергоустановки (ВЕУ), які, зазвичай, працюють в автономному режимі. Їх застосовують окремі споживачі для електрозабезпечення за відсутності централізованих електромереж або за наявності останніх для додаткового електроживлення для зниження електроспоживання від мережі, підвищення енергоефективності, забезпечення безперебійності електропостачання тощо.

Малопотужні ВЕУ встановлюють безпосередньо біля споживачів, де вітер характеризується переважно невисокими середніми швидкостями, частою зміною напрямків і високою турбулентністю. Ці особливості зумовлюють суттєву відмінність конструкцій малопотужних ВЕУ від уже традиційних великої потужності. Зокрема, застосовуються ВЕУ з вертикальною віссю обертання (ВВО), які ефективно працюють з поривчастими вітрами, постійно сприймають вітер різних напрямків і стартують за малої швидкості вітру завдяки безредукторному приводу тихохідного багатополосного синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ).

Актуальність теми. 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 їх максимальної енергетичної ефективності в усіх режимах роботи, особливо за низьких швидкостей вітру, на яких ці ВЕУ переважно працюють. Створення високоякісних ефективних систем автоматичного керування ВЕУ з ВВО можливе на основі адекватного математичного опису процесів, що мають місце в різних режимах їхньої роботи.

Через стохастичну природу процесів генерування та споживання електроенергії в автономних ВЕУ, для забезпечення неперервності електроживлення та кращого використання генерованої електроенергії, застосовують електрохімічні акумуляторні батареї (АБ). Проте їхня висока вартість і порівняно низький термін служби значно підвищують сукупну вартість системи автономного електроживлення на базі ВЕУ. Задля економії коштів знижують ємність встановлених АБ, внаслідок чого зростає частина генерованої електроенергії, яку неможливо безпосередньо спожити чи нагромадити. Таку електроенергію (англійською *dump energy*), зазвичай, втрачають, навантажуючи генератор на додаткові опори. Проте доцільніше застосувати термоелектричні нагрівачі (ТЕН) і помістити їх у бойлер з метою підігрівання води для опалення та гарячого водопостачання.

Питанням спільного розгляду процесів генерування електричної й теплової енергій в малопотужних електротеплових ВЕУ та розробленню нових підходів до побудови енергоефективних і водночас простих систем керування цими процесами до цього часу практично не приділяли належної уваги.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проводилися в Національному університеті «Львівська політехніка» відповідно до наукового напрямку Інституту енергетики та систем керування «Ресурсозберігаючі технології та інтелектуальні системи керування в енергозабезпеченні об'єктів економічної діяльності». Дисертація виконувалася в межах держбюджетних науково-дослідних робіт: «Електромеханотронна система перетворення енергії для безредук-

торних 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 роботи 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 ВВО та дослідити закономірності роботи малопотужних вітроустановок;
- створити систему енергоефективного керування ВЕУ з врахуванням впливу параметрів навколишнього середовища на аеродинамічну характеристику вітротора (ВР) 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 вітроторах 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. У дисертаційній роботі:

1. Набула подальшого розвитку теорія керування ВЕУ, зокрема встановлено математичну залежність аеромеханічної сталої часу вітротора 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 електротеплових 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 у співавторстві, автором: [1] – проведено імітаційні комп'ютерні дослідження енергоефективності роботи ВЕУ різної

потужності при роботі на низькошвидкісних турбулентних вітрах; [2] – створено імітаційну комп'ютерну модель і проведено симуляційні дослідження роботи електротеплової ВЕУ; [4] – створено експериментальну установку та проведено дослідження закономірностей процесу генерування теплоти в рухомому струмопровідному середовищі за допомогою стаціонарного магнітного поля; [6] – розроблено комбінований регулятор з нечітким коректором для енергоефективного керування роботою ВЕУ з врахуванням впливу параметрів навколишнього середовища на аеродинамічні властивості ВР; [7] – створено дослідну установку та проведено експериментальні дослідження роботи ЕПМЕТ; [8] – запропоновано структуру системи енергоефективного керування електротепловою ВЕУ; [9] – 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» (с. Миколаївка, Крим, 2011); X 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 також наукових семінарах кафедри «Електричні машини і 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.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить вступ, 5 розділів, висновки, викладена на 246 стор. друкованого тексту, в тому числі основний текст на 149 стор., містить 116 рисунків, 6 таблиць, частина з яких займає повних 42 стор., 5 додатків на 25 стор. і 178 назв використаної літератури на 21 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, дано загальну характеристику роботи.

У першому розділі проведено аналіз особливостей процесів та існуючих технічних засобів для генерування електроенергії малопотужними ВЕУ в умовах обмеженого вітрового енергоресурсу. Особливу увагу зосереджено на аналізі побудови систем керування малопотужними ВЕУ в різних режимах роботи.

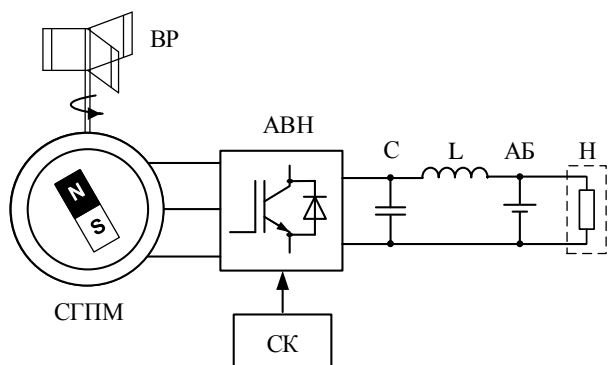


Рис. 1. Функціональна схема перспективної системи автономної ВЕУ з ВВО

но варіант автономної ВЕУ (рис. 1) зі швидкохідним ВР Дар'є з прямими лопатями (Н-ротор), який безпосередньо зв'язаний з ротором СГПМ, обмотка якоря якого через активний випрямляч напруги (АВН) навантажується на акумуляторну батарею (АБ). До останньої підключається навантаження Н у вигляді споживачів постійного струму та через інвертор напруги – змінного струму.

Основною аеродинамічною характеристикою ВР є залежність коефіцієнта використання потужності вітру від швидкохідності ВР – $C_p(\lambda)$, де $\lambda = \omega r / V_B$, ω і r – кутова швидкість і радіус ВР; V_B – швидкість вітру. За кожної швидкості вітру механічна потужність на валу ВР $P_{ВР}$ має максимум, що відповідає максимуму характеристики $C_p(\lambda)$ в точці C_{pmax} за λ_{opt} . При цьому в точках максимуму відбору потужності (ТМВП) від вітру має місце прямопропорційна залежність $\omega_{opt} = (\lambda_{opt} / r) V_B$.

Однією з найважливіших характеристик ВЕУ є її крива вихідної потужності – залежність вихідної електричної потужності $P_{ВЕУ}$ від швидкості вітру (рис. 2). Робочими вітровими діапазонами для ВЕУ є зона неповного навантаження 2 та зона обмеження потужності 3.

Завданням автоматичного керування роботою ВЕУ з ВВО з аеродинамічно пасивним Н-ротором (з нерухомими лопатями) в зоні 2 за низьких і середніх значень швидкості вітру ($V_{B,min} \dots V_{B,n}$) є забезпечення такого оптимального електричного навантаження ВЕУ, щоб ВР увесь час обертався з оптимальною кутовою швидкістю та працював у ТМВП. Для забезпечення такого регулювання серед великої кількості

проаналізованих у дисертації САК найпоширенішими є побудовані за структурою оптимального керування за моментом (англ. optimal torque control – ОТС) без давача швидкості вітру (рис. 3). При цьому завдання оптимального електромагнітного моменту для роботи в ТМВП рівне

$$M_{ВРopt} = k_M \omega^2, \quad (1)$$

де $k_M = 0,5 \rho_{п} A C_{pmax} (r / \lambda_{opt})^3 = const$; $\rho_{п}$ – густина повітря; A – площа омивання ВР.

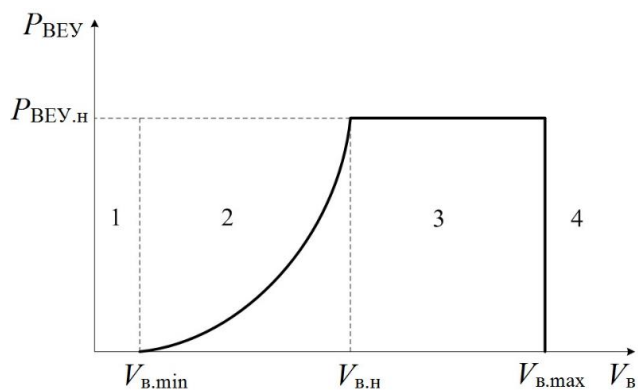


Рис. 2. Залежність вихідної електричної потужності ВЕУ від швидкості вітру

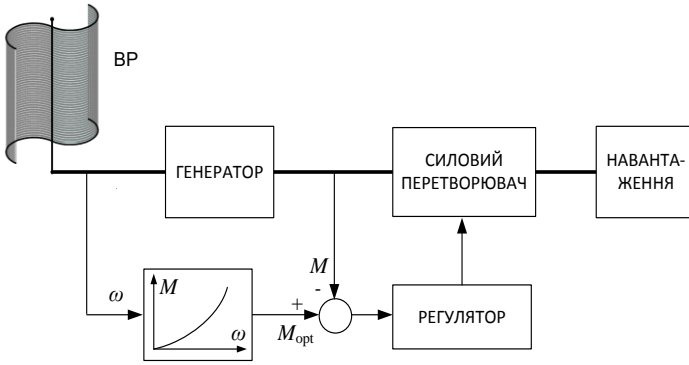


Рис. 3. Блок-схема бездавачевої структури оптимального керування за моментом (ОТС)

Завданням автоматичного керування роботою ВЕУ з ВВО в зоні 3 (рис. 2) на великих швидкостях вітру ($V_{в.н} \dots V_{в.мах}$) є обмеження вихідної електричної потужності на рівні номінального значення, передусім для СГПМ, що виключає його перегрівання. Обмеження пов'язані також із допустимими механічними навантаженнями на ВР. Відомими способами обмеження вихідної потужності ВЕУ з аеродинамічно пасивним ВР на ділянці

високих швидкостей вітру є так звані активні stall- та feathering-регулювання, коли система керування забезпечує відповідно зменшення чи збільшення швидкохідності ВР від оптимального значення та зниження відбору потужності від вітру. Розробленню САК, що забезпечують вказані режими обмеження потужності малих ВЕУ з ВВО, та дослідженню їхньої роботи до цього часу не присвячено належної уваги.

На основі проведеного аналізу сформульовано завдання для подальших досліджень, які вирішені у наступних розділах.

У **другому розділі** розроблено математичні та комп'ютерні моделі всіх підсистем ВЕУ з ВВО. При цьому враховано нові фактори: вплив температури повітря, залежність аеродинамічних характеристик ВР від швидкості вітру. Отримано нові характеристики динамічної системи «ВР – генератор з оптимальним керуванням». Здійснено цикл порівняльних досліджень комп'ютерним симулюванням роботи ВЕУ різної потужності на турбулентному вітрі.

На основі проведеного аналізу для досліджень було обрано автономну ВЕУ, побудовану за функціональною схемою, показаною на рис. 1, із системою оптимального керування в зоні 2 (рис. 2) за принципом ОТС (рис. 3). Для такої ВЕУ було розроблено математичні та відповідні їм комп'ютерні (в середовищі MATLAB/Simulink) моделі всіх підсистем: турбулентного вітропотуку, ВР, СГПМ, АВН, САК.

Швидкість турбулентного вітру описана як сума середньої $V_{в.сеп}$ та змінної швидкості вітру $\tilde{V}_в(t)$ (турбулентної складової). Останню отримано у вигляді суми m гармонік, що описуються тригонометричними складовими на частотах f_i з амплітудами A_i та B_i , які визначено за значеннями спектральної густини потужності вітру на цих частотах $S_{vv}(f_i)$ і мають випадково вибрану фазу ϕ_i (від 0 до 2π):

$$V(t) = V_{в.сеп} + \tilde{V}_в(t) = V_{в.сеп} + 2 \sum_{i=1}^m (A_i \cdot \sin(2\pi f_i \cdot t) + B_i \cdot \cos(2\pi f_i \cdot t)), \quad (2)$$

де $A_i = A_{0i} \sin(\phi_i)$; $B_i = A_{0i} \cos(\phi_i)$, $A_{0i} = \sqrt{0,5 S_{vv}(f_i) \Delta f_i}$.

$S_{vv}(f)$ в усьому частотному діапазоні в залежності від середнього значення швидкості вітру, ступеня його турбулентності та характеру місцевості описується моделлю Каймала. За виразом (2) побудовано комп'ютерні моделі для низки значень середньої швидкості вітру та ступенів турбулентності.

Дослідження, проведені упродовж останніх років, показали, що аеродинамічна характеристика ВР $C_p(\lambda)$ не є постійною, а змінюється зі швидкістю вітру за закономірністю, яку в роботі змодельовано функцією

$$C_p(\lambda, V_B) = 1,14 \left(\frac{9,47}{\lambda} - 1 \right) \exp \frac{-f(V_B)}{\lambda}, \text{ де } f(V_B) = 0,003869V_B^2 - 0,128V_B + 6,627. \quad (3)$$

Механічний момент і потужність на валу ВР також залежатимуть від температури повітря ϑ , оскільки остання впливає на густину повітря:

$$\rho_{\text{п}}(\vartheta) = 0,00001661\vartheta^2 - 0,004764\vartheta + 1,2924. \quad (4)$$

Роботу СГПМ, що керується АВН за векторним принципом (вектор струму формується за вектором ЕРС обертання), описано відомими рівняннями балансу напруг в обертовій з ротором системі координат $d-q$, зорієнтованій віссю d уздовж вектора потоку постійних магнітів, рівнянням електромагнітного моменту та рівнянням балансу моментів на валу ВР і генератора.

Створена таким чином загальна математична модель ВЕУ дала змогу проводити імітаційні комп'ютерні дослідження її роботи на вітрах із заданими параметрами.

Проведені дослідження показали досить низьку швидкість роботи малих ВЕУ, керованих за способом ОТС. Для дослідження закономірностей динаміки роботи ВР було побудовано математичну модель його руху з точки оптимальної роботи 1 в точку 2 при зростанні швидкості вітру (рис. 4). З отриманого диференціального рівняння руху було визначено аеромеханічну сталу часу ВР, робота якого оптимально керується за способом ОТС, у вигляді

$$T_{\text{ам}} = k_{\text{ВР}} \frac{J_{\Sigma}}{AV_B r^2}, \quad (5)$$

де $k_{\text{ВР}} = \lambda_{\text{opt}}^2 / (1,5\rho_{\text{п}}C_{\text{Pmax}})$ – сталий для ВР із заданою аеродинамічною характеристикою $C_p(\lambda)$ коефіцієнт.

Як видно з отриманого виразу (5), аеромеханічна стала конкретного ВР залежить від його параметрів (моменту інерції та геометричних розмірів – A та r), які пов'язані з потужністю ВЕУ, а також є обернено пропорційною до швидкості вітру.

Для перевірки отриманої закономірності, а також подальшого дослідження динаміки роботи малопотужних ВЕУ, було обрано п'ять ВЕУ з ВВО потужністю 0,5, 1, 2, 5 і 10 кВт, розрахованих на номінальну швидкість вітру $V_{\text{в.н}} = 10$ м/с. Усі вони мали однакову аеродинамічну характеристику $C_p(\lambda)$, описану виразом (3), а параметри ВР-ів і СГПМ для цих ВЕУ було розраховано за створеною методикою. При цьому обчислені за (5) значення $T_{\text{ам}}$ для дослідних ВЕУ мали значну відмінність

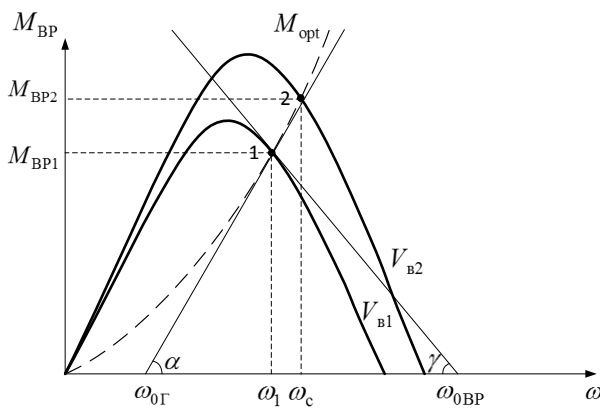


Рис. 4. До математичного опису переходної функції кутової швидкості ВР як реакції на зростання швидкості вітру від $V_{\text{В1}}$ до $V_{\text{В2}}$

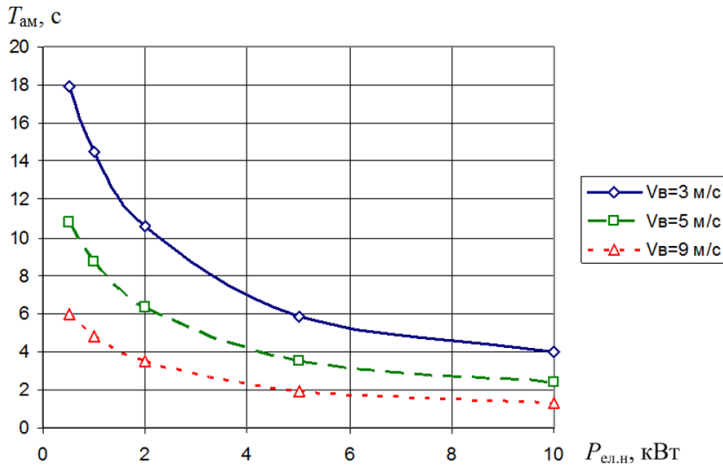


Рис. 5. Залежність аеромеханічної сталої часу ВР, що працює в ТМВП, від потужності ВЕУ за різних швидкостей вітру

Ведені дослідження роботи дослідних ВЕУ на турбулентних вітрах із різною середньою швидкістю вітру підтвердили отриману закономірність (рис. 5) і показали, що, на відміну від потужних, динаміка малопотужних ВЕУ (менших 10 кВт) стрімко знижується, особливо при роботі на низькошвидкісних вітрах. Це зумовлює актуальність досліджень, спрямованих на підвищення якості автоматичного керування роботою малих ВЕУ порівняно з ОТС.

У третьому розділі для малопотужних ВЕУ, що працюють в режимі генерування електричної енергії, створено нові системи керування, для підвищення енергетичної ефективності їхньої роботи на низькошвидкісних вітрах, а також досліджено й запропоновано структури регуляторів для обмеження максимальної потужності при роботі на великих вітрах.

Метою роботи ВЕУ є не відбір ВР максимальної механічної потужності від вітру $P_{ВР}$, а отримання максимальної електричної потужності на виході P_e . Остання

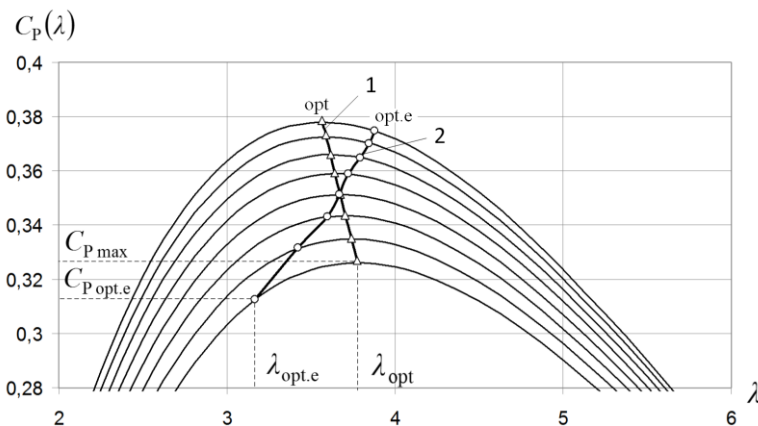


Рис. 6. Положення оптимальних робочих точок ВР на кривих $C_p(\lambda, V_B)$:

- 1 – оптимальні з аеродинамічної точки зору,
- 2 – оптимальні з електроенергетичної точки зору

(рис. 5). Ефективність відбору потужності від вітру на різних його швидкостях у дослідних ВЕУ оцінювали коефіцієнтом відбору $k_B = W_{ВР}/W_{ВР\max}$, де $W_{ВР}$ та $W_{ВР\max}$ – значення механічної енергії, що генерується на валу ВР відповідно для дослідної та аналогічної ідеалізованої ВЕУ (параметри обох ВЕУ однакові, окрім моменту інерції, значення якого наближається до 0). Завдяки останньому кутова швидкість ідеалізованої ВЕУ практично безінерційно повторює зміну турбулентного вітру, працюючи постійно в ТМВП. Про-

ведені дослідження роботи дослідних ВЕУ на турбулентних вітрах із різною середньою швидкістю вітру підтвердили отриману закономірність (рис. 5) і показали, що, на відміну від потужних, динаміка малопотужних ВЕУ (менших 10 кВт) стрімко знижується, особливо при роботі на низькошвидкісних вітрах. Це зумовлює актуальність досліджень, спрямованих на підвищення якості автоматичного керування роботою малих ВЕУ порівняно з ОТС.

У третьому розділі для малопотужних ВЕУ, що працюють в режимі генерування електричної енергії, створено нові системи керування, для підвищення енергетичної ефективності їхньої роботи на низькошвидкісних вітрах, а також досліджено й запропоновано структури регуляторів для обмеження максимальної потужності при роботі на великих вітрах.

Метою роботи ВЕУ є не відбір ВР максимальної механічної потужності від вітру $P_{ВР}$, а отримання максимальної електричної потужності на виході P_e . Остання залежить також від втрат потужності в СГПМ. Дослідження рівняння балансу потужностей системи ВР–СГПМ на максимум P_e в ustalених режимах роботи ВЕУ номінальною потужністю 1 кВт на вітрах із різними швидкостями дало змогу знайти оптимальні з електроенергетичної точки зору робочі точки ВР. Положення останніх суттєво відмінне від оптимальних з аеродинамічної точки зору (рис. 6). Відповідно до нових точок оптимальної роботи ВР

$C_{P_{opt.e}}[\lambda_{opt.e}(V_B), V_B]$, а також до значень температури повітря, будуть змінюватися й нові значення коефіцієнта $k_{M.e}(V_B, \vartheta)$, котрий обчислюється аналогічно до виразу (1)

$$k_{M.e}(V_B, \vartheta) = 0,5 \rho_{\Pi}(\vartheta) A C_{P_{opt.e}}[\lambda_{opt.e}(V_B), V_B] \left[r / \lambda_{opt.e}(V_B) \right]^3 \quad (6)$$

і визначає оптимальний з точки зору отримуваної на виході ВЕУ електричної потужності момент навантаження на валу ВР: $M_{BP.e.opt}(\omega) = k_{M.e}(V_B, \vartheta) \omega^2$.

$k_{M.e}(V_B, \vartheta)$ доцільно представити у вигляді добутку базового значення сталого коефіцієнта $k_M = 0,06282 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, визначеного за (1) з рівняння для незалежної від умов праці ВР характеристики $C_P(\lambda, V_B = 6 \text{ м/с})$, та коефіцієнта корекції вказаного базового значення k_M : $k_k(V_B, \vartheta) = k_{M.e}(V_B, \vartheta) / k_M$. Для отримання поточних значень $k_k(V_B, \vartheta)$ було застосовано нечіткий коректор (НК).

Включення НК в структуру регулятора оптимального керування роботою ВЕУ показано на рис. 7. Оскільки в системі повинен бути давач швидкості вітру, то доцільно 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 аеромеханічна стала часу ВР

значно зростає. В структурі на рис. 7 регулювання за відхиленням реалізується з допомогою регулятора швидкості РШ.

Для обмеження електричної потужності СГПМ при роботі ВЕУ на швидкостях вітру, що перевищують номінальне значення, розроблено структури регуляторів, які забезпечують зменшення швидкохідності ВР по-

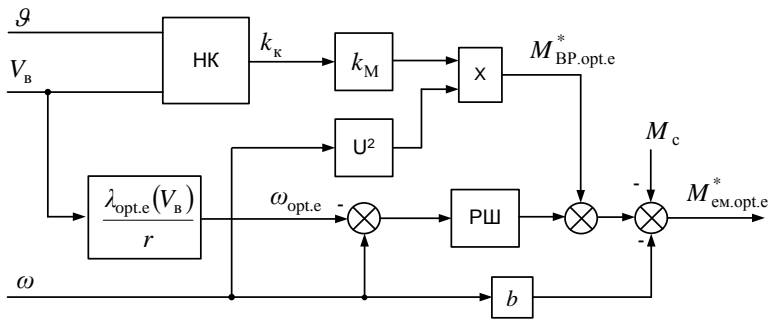


Рис. 7. Структурна схема комбінованого регулятора для оптимального керування роботою ВЕУ

рівняно з оптимальною (stall-регулювання) та її збільшення (feathering-регулювання) (рис. 8). В обох випадках застосовано ПІ-регулятори потужності РП, на виходах яких на великих вітрах формується сигнал додаткового завдання на електромагнітний момент СГПМ $M_{ем.Р.дод}^*$, додатний у випадку stall-регулювання та від'ємний у випадку feathering-регулювання. Це призводить до зміщення робочої точки ВР відповідно вліво та вправо від ТМВП. Відмінності між наведеними системами полягають у формуванні сигналів перевищення заданої потужності на вході РП, що зумовлено різним характером нелінійностей зліва й справа від точки оптимального моменту на кривій механічної характеристики ВР $M_{BP}(\omega)$: за stall-регулювання, це потужність ВР, яка оцінюється естиматором потужності ЕП, а за feathering-регулювання, це електромагнітна потужність СГПМ.

Проведені імітаційні комп'ютерні дослідження роботи досвідної ВЕУ у вказаних режимах дали змогу оцінити переваги й недоліки кожного із способів обмеження потужності та здійснити вибір на користь stall-регулювання.

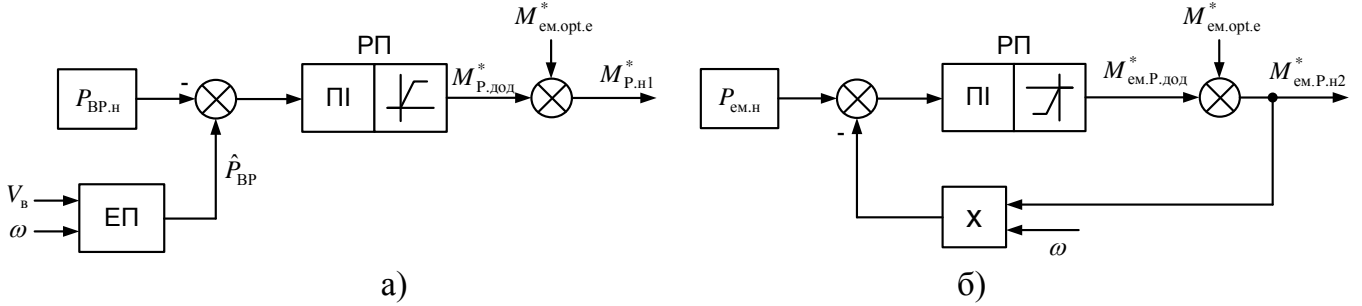


Рис. 8. Структурні схеми САР, що забезпечують обмеження потужності ВЕУ при роботі на великих вітрах: а) stall-регулювання, б) feathering-регулювання

Четвертий розділ присвячено дослідженням, спрямованим на створення двох варіантів автономної електротеплової ВЕУ, для яких розроблено варіанти реалізації енергоефективних і водночас недорогих САК, а також когенераційної ВЕУ з ВВО.

В автономній електротепловій ВЕУ з періодичним навантаженням СГПМ забезпечується таке періодичне підключення до генератора ТЕН-ів, при якому кутова швидкість ВР коливається навколо ТМВП, забезпечуючи квазіоптимальне керування роботою ВЕУ. Для цього задано робочу зону навколо оптимальної швидкохідності ВР λ_{opt} : навантаження вмикається при $\lambda_{on} = 4,46$, а вимикається при $\lambda_{off} = 3,02$ (рис. 9). Значення λ_{off} і λ_{on} отримані з кривої $C_p(\lambda, V_B = 6 \text{ м/с})$ для $0,95C_{p,max}$.

Для визначення моменту ввімкнення ТЕН-ів з рівняння балансу моментів на валу ВР отримано таку залежність його кутового прискорення ε_1 від кутової швидкості ω в момент досягнення ВР швидкохідності λ_{on} :

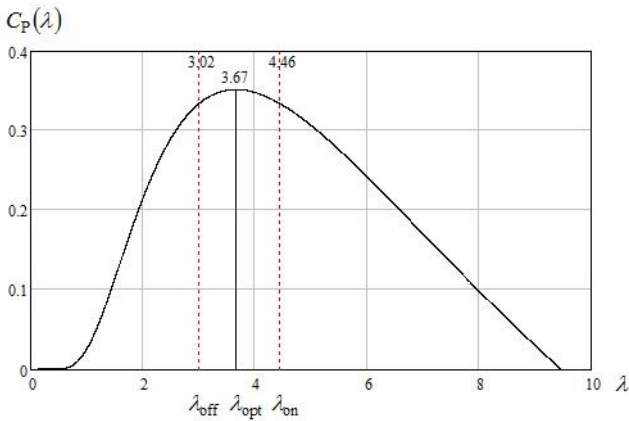


Рис. 9. Зона робочої швидкохідності ВР при його періодичному навантаженні

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{J_\Sigma} \left[0,5 \rho_\Pi A r^3 \frac{C_p(\lambda_{on})}{\lambda_{on}^3} \omega^2 - b \omega - M_c \right],$$

де b – коефіцієнт в'язкого тертя, а M_c – момент сухого тертя на валу ВР.

Для системи ВР–СГПМ, навантаженої симетрично на трьох з'єднаних у зірку ТЕН-ів з активним опором R_T , отримано таке диференціальне рівняння, що описує зміну швидкохідності ВР:

$$\frac{d\lambda}{dt} = 0,5 \mu_\Pi \frac{Ar^2}{J_\Sigma} V_B \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} - \frac{b}{J_\Sigma} \lambda - M_c \frac{r}{V_B J_\Sigma} - B, \quad (7)$$

де після підключення до генератора ТЕН-ів

$$B = \frac{3}{2} \cdot \frac{(p\Phi_m)^2}{J_\Sigma} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{(R + R_T)^2 + (pL\lambda V_B/r)^2}} \cos\left(\arctg \frac{pL\lambda V_B/r}{R + R_T}\right), \quad (8)$$

а після їхнього відключення $B = 0$.

У рівнянні (8) застосовано такі параметри СГПМ: p – кількість пар полюсів; R , L – відповідно активний опір та індуктивність обмотки якоря; Φ_m – амплітуда потокозчеплення обмотки якоря з парою полюсів постійних магнітів ротора.

На основі рівнянь (7) і (8) розроблено методику визначення раціонального значення опорів ТЕН-ів як компромісу між тепловим ККД $\eta_T = R_T / (R_T + R)$ та діапазоном швидкостей вітру, за якого здійснюється періодичне навантаження ВЕУ. На рис. 10 наведено результати комп'ютерного симулювання роботи такої електротеплової ВЕУ потужністю 5 кВт на різних швидкостях вітру: 3,5 м/с, 5,0 м/с та 6,8 м/с.

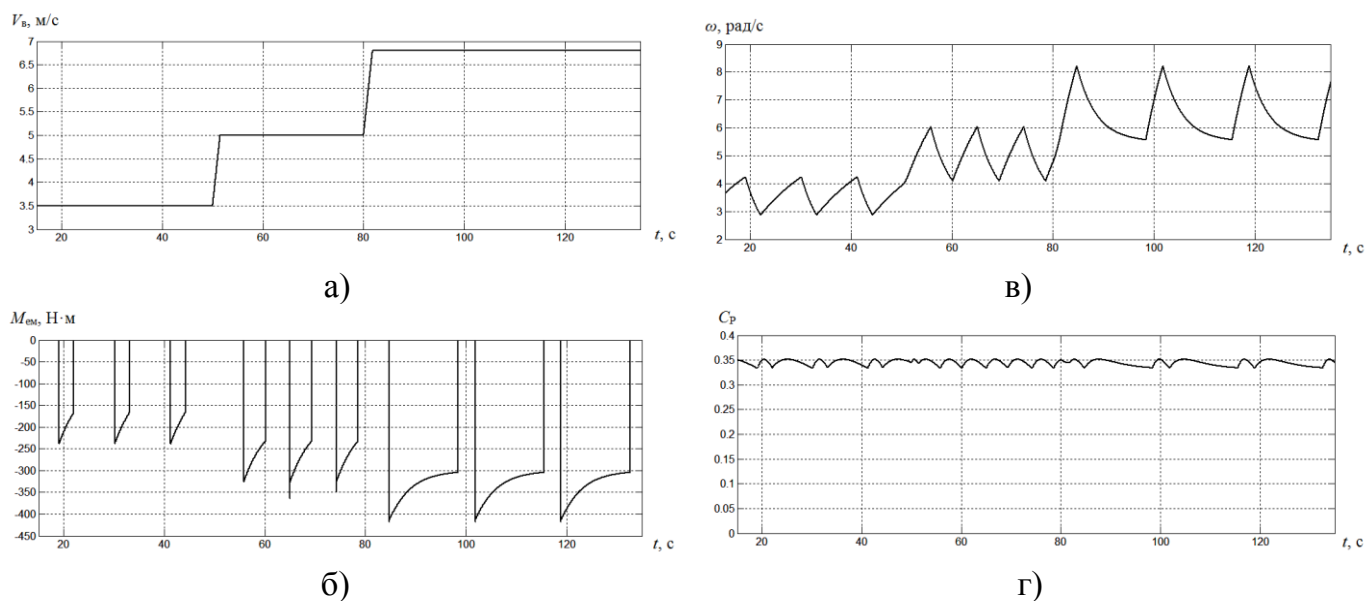


Рис. 10. Часові залежності основних координат досліджуваної електротеплової ВЕУ в режимі періодичного навантаження СГПМ: а) тестова швидкість вітру, б) електромагнітний момент, в) кутова швидкість ВР, г) коефіцієнт потужності ВР

Генерування електричної енергії відбувається пасивно, без регулювання, коли випрямлена ЕРС СГПМ буде більшою від напруги АБ.

Проведені на комп'ютерній моделі імітаційні дослідження дали змогу визна-

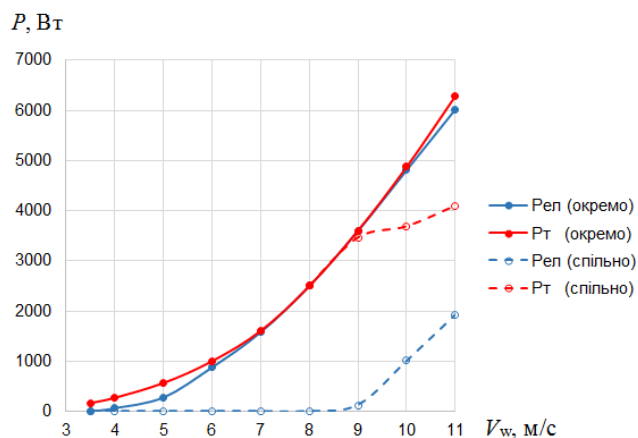


Рис. 11. Криві потужності дослідної електротеплової ВЕУ в режимах генерування різних видів енергії

чити криві потужності дослідної електротеплової ВЕУ номінальною потужністю 5 кВт в режимах генерування лише електричної енергії $P_{ел}$ (окремо), лише теплової P_T (окремо) й одночасного генерування обох видів енергії – $P_{ел}$ (спільно) та P_T (спільно) (рис. 11). Як видно з отриманих результатів, електротеплова ВЕУ може ефективно працювати в режимі генерування теплової енергії в усьому робочому діапазоні швидкостей вітру. 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.

В електротепловій ВЕУ з низькочастотним імпульсним регулюванням навантаження СГПМ, для зменшення динамічних механічних навантажень, запропоновано збільшити частоту підключення ТЕН-ів, застосувавши модифікований за принципом ШІМ спосіб число-імпульсного низькочастотного регулювання (рис. 12). Період ШІМ-регулювання складається з k періодів напруги СГПМ T_c , а протягом n періодів цієї напруги за допомогою двох електронних ключів до якоря підключаються ТЕН-и, причому в момент переходу напруг цих фаз через нуль.

Отримано рівняння, що описує усталений режим генерування теплоти:

$$0,57 \rho_{\text{п}} A \left(\frac{9,47}{\omega r} V_{\text{в}} - 1 \right) \exp \left(- \frac{6}{\omega r} V_{\text{в}} \right) V_{\text{в}}^3 - (M_c + b\omega) \omega = \frac{3}{2} \cdot \frac{(p\Phi_m \omega)^2 (R + R_r)}{(R + R_r)^2 + (p\omega L)^2} \cdot \frac{n}{k} \quad (9)$$

Для дослідної електротеплової ВЕУ номінальною потужністю 5 кВт за отриманими з рівняння (9) значеннями ω для різних швидкостей вітру обчислені залежності $C_p(n)$, які мають чітко виражені максимуми при n_{opt} . Із точок максимумів для різних швидкостей вітру складено функцію оптимального керування навантаженням СГПМ у вигляді

$$n_{\text{opt}} = -2,08 + 1,37 \omega. \quad (10)$$

За такого керування електротеплова ВЕУ має характеристики, близькі до попереднього випадку періодичного навантаження СГПМ, проте відрізняється практично невідчутними коливаннями кутової швидкості.

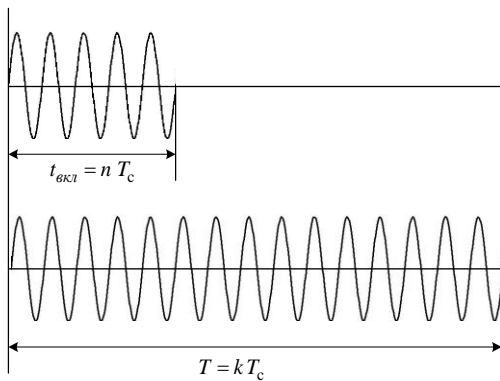


Рис. 12. Спосіб імпульсного низькочастотного регулювання навантаження генератора ВЕУ

Поряд із дешевими варіантами електротеплових ВЕУ запропоновано принципово іншу концепцію, дорожчу, проте позбавлену вказаних недоліків і з новими якостями – **автономну когенераційну ВЕУ з ВВО**. У ній на валу ВР встановлено два генератори: СГПМ і тепловий генератор – електромагнітний перетворювач механічної енергії в теплоту (ЕПМЕТ). Принцип роботи останнього ґрунтується на генеруванні вихрових струмів у сталевому роторі, який обертається в стаціонарному магнітному полі, створеному полюсами нерухомого індуктора. Побудовано математичну модель, що описує механічні, електромагнітні й теплові процеси, що мають місце в роботі ЕПМЕТ.

Для ЕПМЕТ як об'єкта регулювання побудовано САК із двома різними САР (рис. 13), які доцільно застосовувати в різних режимах роботи когенераційної ВЕУ:

1. САР за відхиленням від заданої теплової потужності. Остання може мати різні варіанти формування. У режимі неповного навантаження ВЕУ, якщо потужність генерованої електричної енергії обмежена через невелике її споживання та відсутність АБ чи їхню повну зарядженість, задана теплова потужність повинна забезпечувати таке додаткове механічне навантаження на ВР, щоб його робота

відбувалася в ТМВП. У режимі обмеження потужності на великих вітрах задана теплова потужність може забезпечувати stall- чи feathering-регулювання, аналогічно до забезпечення цього режиму каналом генерування електроенергії.

Така САР (перемикач S – у верхньому положенні) має структуру системи підпорядкованого регулювання з внутрішнім контуром регулювання струму збудження ЕПМЕТ із регулятором струму збудження РСЗ і зовнішнім контуром регулювання теплової потужності з регулятором потужності РП.

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

Така САР (перемикач S – у нижньому положенні) має комбіновану структуру: внутрішній контур регулювання струму збудження ЕПМЕТ за відхиленням залишається без змін, тоді як зовнішній контур регулюється за збуренням кутової швидкості ω . Для цього виміряна кутова швидкість генератора подається на вхід блока оптимального регулювання ОП, в якому реалізується регулювальна характеристика конкретного ЕПМЕТ, що приводиться в рух конкретним ω – функціональна залежність оптимального значення струму збудження ЕПМЕТ від його кутової швидкості $I_f^*(\omega)$.

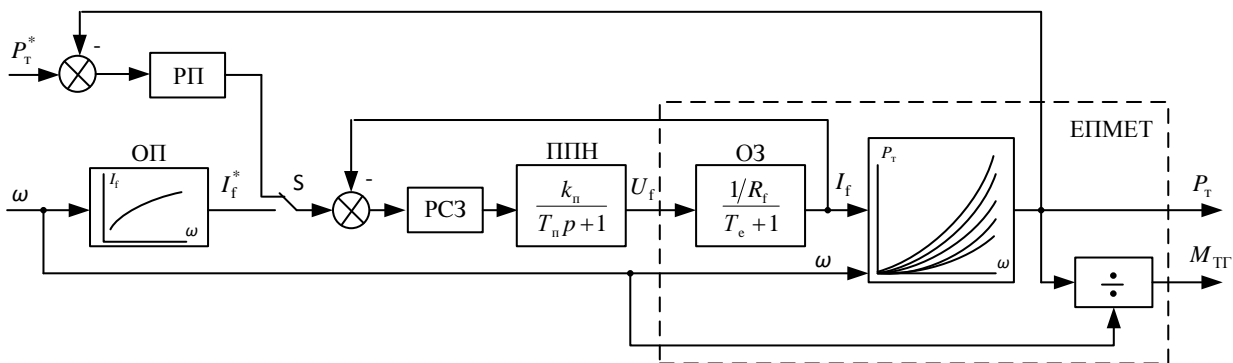


Рис. 13. Структурна схема системи керування ЕПМЕТ

Когенераційна ВЕУ за будь-якої швидкості вітру може працювати ефективно, генеруючи лише електричну, лише теплову або обидва види енергії, а також накопичувати їх відповідно в АБ і тепловому бойлері. Для ефективного керування цими процесами створено дворівневу систему. На нижньому рівні працюють локальні системи оптимального керування генеруванням електричної (рис. 8) і теплової (рис. 13) енергії. Для керування на верхньому рівні розроблено алгоритм керування енергопотоками за стохастичного характеру як генерування, так і споживання енергії. Пріоритетом виступає генерування електроенергії як енергії вищої якості та пряма передача її споживачеві, що забезпечуватиме найменші її втрати. При надлишковій електричній потужності зайва електрична енергія накопичується в АБ. За повної зарядженості останньої надлишкова, отримувана ω від вітру механічна енергія перетворюється в ЕПМЕТ у теплоту. В усіх цих режимах забезпечується екстремальне керування та відбір максимальної потужності

від вітру за його змінної швидкості в зоні 2 роботи ВЕУ й обмеження її потужності при роботі в зоні 3. Алгоритмом також передбачено функцію енергетичного менеджменту АБ: моніторинг ступеню їхньої зарядженості, запобігання як перерозряджання, так і перезаряджання, а також обмеження струму заряджання та дворівневий захист від надструмів розряджання.

Дослідження роботи когенераційної автономної ВЕУ здійснювалося комп'ютерним симулюванням. До вже створеної загальної комп'ютерної моделі ВЕУ було додано нові підсистеми: підсистема ЕПМЕТ, підсистема передачі теплоти до бойлера та підсистема керування енергопотоками ВЕУ на верхньому рівні. Результати комп'ютерного симулювання підтвердили працездатність й енергетичну ефективність когенераційної автономної ВЕУ.

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень усіх розроблених систем керування електротепловими ВЕУ.

Створено дослідний стенд із фізичним симулятором роботи ВР, електричним і тепловим генераторами та промисловим контролером, в якому реалізовано всі алгоритми керування (рис. 14).

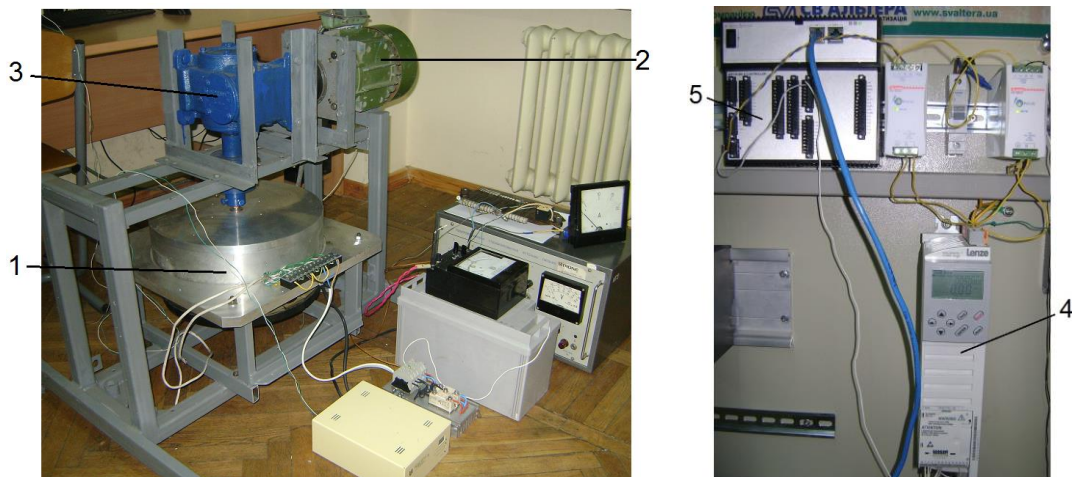


Рис. 14. Експериментальний стенд для дослідження розроблених систем керування електротепловими ВЕУ з ВВО: 1 – макетний взірєць блока генераторів, 2 – привідний асинхронний двигун, 3 – редуктор, 4 – перетворювач частоти, 5 – контролер

Фізичне симулювання роботи ВР здійснюється асинхронним двигуном (АД) 2, який через редуктор 3 приводить в рух блок генераторів 1. Керування АД здійснюється перетворювачем частоти 4 Lense 8200 Vector з функцією керування моментом. Завдання на електромагнітний момент АД формується контролером 5 WP130 МК II відповідно до отриманого закону керування, який забезпечує ідентичну роботу ВЕУ з ВВО та експериментального стенда, що здійснює фізичну симуляцію роботи ВР:

$$M_{\text{АД}} = \frac{1}{i} \left[M_{\text{ВР}} - (M_{\text{с}} - i M_{\text{с.ст(АД)}}) - (b - i^2 b_{\text{ст(АД)}}) \omega - (J_{\Sigma} - i^2 J_{\text{ст(АД)}}) \frac{d\omega}{dt} \right], \quad (11)$$

де i – передавальне число редуктора; $M_{\text{с.ст(АД)}}$, $J_{\text{ст(АД)}}$, $b_{\text{ст(АД)}}$ – момент сухого тертя, момент інерції та коефіцієнт в'язкого тертя стенда, приведені до валу АД.

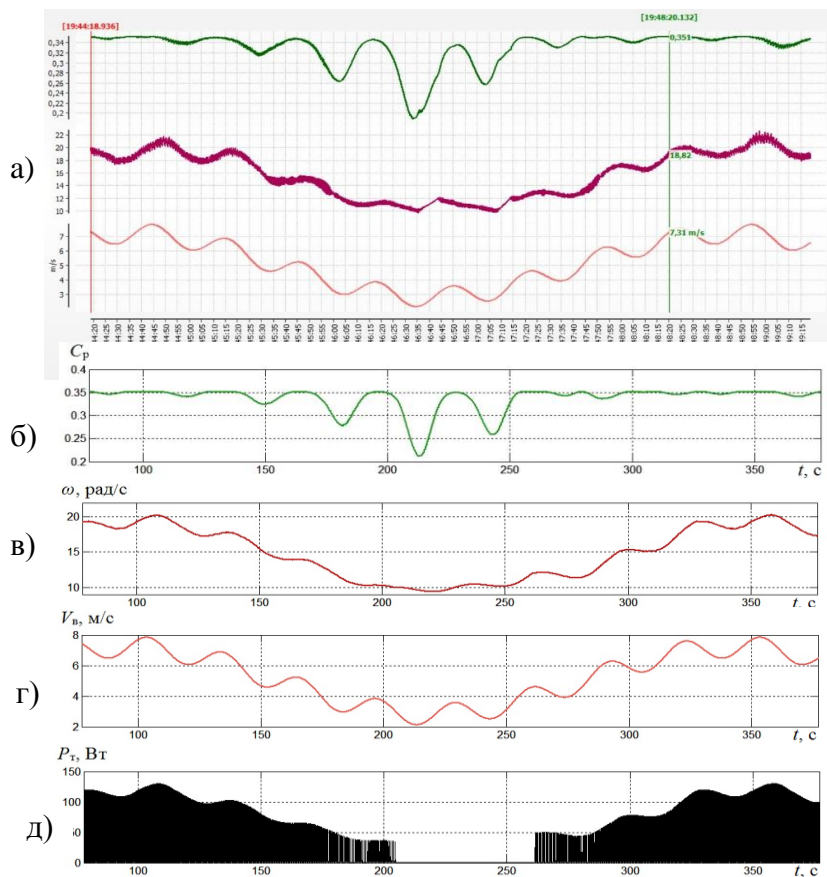


Рис. 15. Часові залежності основних координат за роботи дослідної електротеплової ВЕУ в режимі генерування теплової енергії шляхом імпульсного низькочастотного навантаження СГПМ, отримані на дослідному стенді (а) та на комп'ютерній моделі: б) коефіцієнт використання потужності вітру, в) кутова швидкість ВР, г) тестова швидкість вітру, д) теплова потужність

яння результатів комп'ютерного симулювання роботи дослідної ВЕУ та фізичного експерименту на дослідному стенді за дії вітру з аналогічною часовою залежністю швидкості. На рис. 15 приведені деякі результати одного з дослідів у вигляді часових залежностей основних координат, отриманих експериментально та комп'ютерним симулюванням, які показують їхнє достатнє узгодження.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача – створення нових систем керування автономними вітроустановками малої потужності, які генерують як електричну, так і теплову енергію, що забезпечує розширення функціональних можливостей таких ВЕУ, підвищення їхньої енергетичної ефективності та зниження вартості. 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 найефекти-

Перевірка адекватності роботи фізичного симулятора роботи ВР була проведена в режимі генерування електричної енергії – навантаження СГПМ на АБ в режимі зарядження спочатку в усталених режимах роботи на вітрах із заданою постійною швидкістю вітру, а потім на сформованому профілі вітру. При цьому порівнювалися результати роботи стенда та комп'ютерної моделі дослідної ВЕУ. Різниця отриманих результатів не перевищувала 18%.

На дослідному стенді проведено три серії досліджень, відповідно для електротеплових ВЕУ з періодичним навантаженням СГПМ на ТЕН-и, імпульсним низькочастотним навантаженням, а також для когенераційної ВЕУ в режимі оптимального керування збудженням ЕПМЕТ. Проведено порів-

внішою можна вважати таку конструкцію малопотужної ВЕУ: вертикальноосьовий швидкохідний 3-лопатевий Н-ротатор, безредукторна трансмісія, багатополосний 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 низькошвидкісних 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-ротатором 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 тепла 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 сис-

тем 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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. (наукометрична база Scopus).
5. 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.
6. Щур В. І. Система керування енергопотоками в когенераційній автономній вітроенергоустановці / В. І. Щур // Вестн. Націон. техн. ун-та «ХПИ»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Силовая электроника и энергоэффективность. – № 12 (1121). – Харьков, 2015. – С. 414-419.
7. Щур І. З. Електромагнітний генератор теплової енергії для автономних вітроенергоустановок з вертикальною віссю обертання / І. З. Щур, О. В. Макачук, 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.
8. 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.
9. Патент на винахід № 105743, МПК F03D 9/02 (2006.01), H05B 6/10 (2006.01). Вітрова теплоелектростанція / Щур І. З., Макачук 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.
 10. Щур В. І. Система керування навантаженням генератора вітроустановки в умовах турбулентних вітрів / В. І. Щур // Тези XII Міжн. наук.-практ. конф. «Відновлювальна енергетика XXI століття», 12-16 вересня 2011 р., смт. Миколаївка, Крим. – К.: Ін-т відновл. енергетики НАНУ. – С. 283-289.
 11. Щур В. І. Математична модель турбулентного вітропотoku 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.

АНОТАЦІЯ

Щур В. І. Енергоефективне керування малопотужними вітроустановками для генерування електричної і теплової енергії. – *На правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2017.

Дисертація присвячена розробленню систем керування процесами генерування електричної і теплової енергії, отримуваної від сонця малопотужними автономними вітроустановками (ВЕУ). Теоретичні дослідження показали, що зі зниженням потужності ВЕУ аеромеханічна стала часу вітроротора (ВР) зростає, а також її значення є обернено пропорційне до швидкості вітру. Для підвищення ефективності відбору енергії від вітру малопотужними ВЕУ, що переважно працюють на низькошвидкісних турбулентних вітрах, розроблено комбінований регулятор, який працює за збуренням швидкості вітру та відхиленням кутової швидкості ВР від усталеного значення. Останнє коректується за принципом нечіткої логіки відповідно до метеорологічних умов роботи ВР – температури повітря та швидкості вітру. Для генерування теплової енергії з електричної запропоновано дві системи двопозиційного регулювання навантаження обмотки якоря генератора на термоелектричні нагрівачі – періодичного й імпульсного низькочастотного. Для таких електротеплових ВЕУ розроблено системи оптимального керування, створено методики обґрунтування параметрів і здійснено імітаційне комп'ютерне симулювання їхньої роботи. Найкращими характеристиками відзначається когенераційна ВЕУ, в якій на валу ВР розміщено додатковий теплогенератор – електромагнітний перетворювач механічної енергії в теплову. Для такої ВЕУ розроблено систему дворівневого автоматичного керування підсистемами генерування електричної й теплової енергії, а також процесами їх нагромадження у

відповідних акумуляторах енергії. Експериментальні дослідження всіх розроблених систем керування проведено на дослідному стенді з фізичним симулятором роботи ВР на турбулентних вітрах та електричним і тепловим генераторами.

Ключові слова: вітроустановка з вертикальною віссю обертання, синхронний генератор з постійними магнітами, електротеплова вітроустановка, когенерація, система оптимального керування, система обмеження потужності вітроустановки.

АННОТАЦИЯ

Щур В. И. Энергоэффективное управление маломощными ветроустановками для генерирования электрической и тепловой энергии. – *На правах рукописи.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2017.

Диссертация посвящена разработке систем управления процессами генерации электрической и тепловой энергии, получаемой от солнца маломощными автономными ветроустановками (ВЭУ). Такие ВЭУ устанавливаются непосредственно у потребителей и работают преимущественно на низкоскоростных турбулентных ветрах. Обоснована целесообразность применения в таких условиях работы ветроротора (ВР) с вертикальной осью вращения, который непосредственно приводит в движение синхронный генератор с постоянными магнитами (СГПМ).

Теоретические исследования показали, что с понижением мощности ВЭУ аэромеханическая постоянная времени ВР возрастает, а также ее значение обратно пропорционально скорости ветра. С целью повышения эффективности отбора энергии от ветра маломощными ВЭУ разработан комбинированный регулятор, который работает по возмущению скорости ветра и отклонению угловой скорости ВР от установившегося значения. Последнее корректируется по принципу нечеткой логики в соответствии с метеорологическими условиями работы ВР – температуры воздуха и скорости ветра.

Для генерирования тепловой энергии с электрической предложены две системы двухпозиционного регулирования нагрузки обмотки якоря СГПМ на термоэлектрические нагреватели – периодического и импульсного низкочастотного. Для таких электротепловых ВЭУ разработаны системы оптимального управления, защищенные патентом на изобретение способа и устройства для его реализации. Созданы методики и компьютерные программы для обоснования параметров электротепловых ВЭУ, а также осуществлено имитационное компьютерное моделирование их работы. Наилучшими характеристиками отличается запатентованная когенерационная ВЭУ, в которой на валу ВР, кроме СГПМ, размещается дополнительный теплогенератор – электромагнитный преобразователь механической энергии в тепловую (ЭПМЭТ). Для такой ВЭУ разработана система двухуровневого автоматического управления: на нижнем уровне – локальные подсистемы оптимального управления процессами генерации электрической и тепловой энергии; на верхнем – система энергетического менеджмента, которая управляет энергопотоками в зависимости от текущего ветроресурса и потребностей в электрической и тепловой энергии, а также

процессами накопления электроэнергии в электрохимических аккумуляторных батареях и тепловом бойлере.

Для экспериментальной проверки теоретических результатов создан опытный стенд с физическим симулятором работы ВР на турбулентных ветрах, реализованным с помощью частотно управляемого по электромагнитному моменту асинхронного двигателя в соответствии с записанной в промышленном контроллере программой. Асинхронный двигатель приводит в движение блок генераторов в составе СПИМ и ЭПМЭТ. Все разработанные системы управления реализованы в контроллере. Проведенные на стенде экспериментальные исследования разработанных систем управления электротепловыми ВЭУ показали их эффективность и отклонения от результатов компьютерного моделирования не более, чем на 20%.

Ключевые слова: ветроустановка с вертикальной осью вращения, синхронный генератор с постоянными магнитами, электротепловая ветроустановка, когенерация, система оптимального управления, система ограничения мощности ветроустановки.

ABSTRACT

Shchur V. I. Energy efficient control of low power wind turbines for electrical and heat power generation. – *On the rights of manuscript.*

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

The thesis is devoted to development of control processes for generation of electrical and heat energy received from the low power stand-alone wind turbines (WT). Theoretical studies have shown that in the same time, with WTs rated power reduction the wind-mechanical time constant of wind rotor (WR) increases, and this value is inversely proportional to the wind speed. In order to increase generated by WTs energy, preferably operating at low and turbulent wind speed, was created the combined regulator that operates in disturbance of wind speed and deviation of WR angular speed from steady state. The last one is adjusting by fuzzy logic corrector in accordance to the weather conditions – air temperature and wind speed. We have developed two control systems for generation of heat energy from electricity. Both of them are based on two-position load control of generator armature winding by the thermoelectric heaters – periodic and low frequency pulses generator load. For such electro-heat WTs were created the optimal control systems and the methods of parameters substantiation. Also the computer simulation of their work was carried out. The best performance has the cogeneration WT, which has built on the same WR-shaft heat generator – electromagnetic transformer of mechanical energy into heat. For this WT was designed the two-level system of automatic control to generate electrical and heat energy. In addition, it was developed the control system of energy accumulation into the batteries. The experimental researches of all developed control systems was executed on the test bench with physical simulator of WR work on turbulent winds and both electrical and heat generators.

Keywords: vertical axis wind turbine, synchronous generator with permanent magnets, electro-heat wind turbine, cogeneration system, optimal control system, wind turbine power limitation system.