

ВІДГУК

**офіційного опонента кандидата технічних наук, професора
Сиротюка Валерія Миколайовича на дисертаційну роботу
Щура Всеволода Ігоровича на тему: «Енергоефективне
керування вітроустановками малої потужності для генерування
електричної і теплової енергії», подану в спеціалізовану вчену
раду Д 35.052.02 Національного університету
«Львівська політехніка» на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук за спеціальністю
05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи**

Актуальність теми

Зважаючи на значне зростання цін на енергоносії в Україні, як ніколи актуальним є розвиток альтернативної енергетики, одним із напрямів якої є вітрова, а саме малопотужні вітроустановки (ВЕУ), які працюють автономно. Такі ВЕУ, за умов правильно вибраного місця встановлення, можуть забезпечувати електроенергією приватні будинки чи невеликі підприємства. Проте через порівняно високу вартість та занадто великий термін окупності малі ВЕУ в Україні ще не набули такої розповсюдженості, як потужні.

У зв'язку з цим, особливої ваги набувають задачі удосконалення систем керування саме малими ВЕУ, які працюють на індивідуального споживача енергії. У дисертаційній роботі автором запропоновано та досліджено низку систем керування ВЕУ, які реалізують комбіноване генерування як електричної, так і теплової енергії, що дає змогу отримувати більшу кількість генерованої з вітру енергії. Крім цього, завдяки генеруванню та нагромадженню двох видів енергії, появилась можливість суттєво зменшити вартість та відповідно скоротити термін окупності малопотужних ВЕУ. Вирішення таких задач належить до наукоємних сучасних технологій, і актуальність проведених досліджень не підлягає сумніву.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, їх достовірність і новизна

Обґрунтованість отриманих у дисертації наукових положень і висновків підтверджується проведенням досліджень із застосуванням теоретичних та експериментальних методів. Автором розроблено комплекс комп'ютерних моделей в середовищі MATLAB/Simulink для симулювання роботи ВЕУ з вертикальною віссю обертання з використанням різних систем керування навантаженням генератора. Для обґрунтування раціональних параметрів цих систем проведено відповідні математичні розрахунки за створеними математичними моделями в програмі MathCAD. Результати

комп'ютерного моделювання порівнювалися з відповідними результатами натурного експерименту зі створеним макетом електротеплової ВЕУ і виявили добре узгодження, похибка не перевищує 20%. Це підтверджує адекватність побудованих імітаційних моделей, достатню обґрунтованість прийнятих допущень та достовірність результатів, отриманих у роботі.

Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи базуються на результатах проведеної дослідницької роботи, що дало змогу покращити динамічні і статичні показники роботи малопотужних ВЕУ в умовах низьких швидкостей вітру турбулентного характеру. Висновки і рекомендації достатньо обґрунтовані коректністю постановки та розв'язання задач досліджень, застосуванням загальновідомих положень фундаментальних законів електротехніки і теорії автоматичного керування, зокрема систем підпорядкованого регулювання та автоматичного керування нелінійними системами.

Наукова новизна роботи полягає особливостях запропонованих та досліджених нових енергоефективних систем керування процесами генерування електричної й теплової енергії, зокрема:

- 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;
- 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;
- уперше запропоновано методи двопозиційного оптимального регулювання навантаження генератора ВЕУ на термоелектричні нагрівачі (ТЕН) з різними способами формування гістерезису та синтезовано відповідні системи керування роботою електротеплових ВЕУ, які поєднують високу енергетичну ефективність з низькою вартістю установки;
- 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 та шляхи використання результатів досліджень

Отримані в роботі теоретичні результати використані у науково-дослідних роботах, що підтверджено відповідними довідками про результати впроваджень:

- створено систему автономного енергозабезпечення на базі ВЕУ з використанням розробленої енергоефективної системи керування;
- результати досліджень використані у навчальному процесі на кафедрі «Електропривод і комп'ютеризовані електромеханічні системи» Національного університету «Львівська політехніка».

Автором запропоновано нові рішення стосовно конструкції та системи керування процесами у електротепловій ВЕУ, які захищені двома патентами України на винахід.

Розроблені в дисертації комп'ютерні імітаційні моделі роботи ВЕУ з вертикальною віссю обертання на турбулентних вітрах із заданими параметрами, а також ефективні системи керування навантаженням генератора можуть бути використані для подальших досліджень з метою розроблення нових високоефективних систем керування, а також в навчальному процесі.

Оцінка об'єму та змісту дисертації

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів з висновками, загальних висновків, переліку використаних джерел у кількості 178 позицій, 5-х додатків, у тому числі з довідками про результати впроваджень дисертаційної роботи. Загальний об'єм дисертації складає 246 сторінок.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, підтверджено зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і завдання досліджень, наукову новизну одержаних результатів і практичну цінність роботи, висвітлено особистий внесок здобувача та наведено відомості про апробацію і публікації основних результатів дисертації.

У **першому розділі** проведено огляд існуючих типів вітроустановок малої потужності та їх умов роботи. Як більш перспективні визначено ВЕУ з вертикальною віссю обертання та проведено їх класифікацію. Також у розділі розглянуто перебіг аеродинамічних процесів у ВЕУ з вертикальною віссю обертання та показано вплив геометричних параметрів вітроротора на його аеродинамічну характеристику. Автором розглянуто режими роботи автономних ВЕУ та існуючі системи керування для кожного з них. Як мало досліджений, але перспективний напрям виділено можливість генерування теплової енергії малопотужними ВЕУ. Сформовано висновки до розділу та завдання для вирішення у дисертаційній роботі.

У **другому розділі** розроблено математичні та комп'ютерні моделі ВЕУ, що описують роботу її окремих складових: підсистема турбулентного вітропотoku, підсистема вітроротора, підсистема синхронного генератора з

постійними магнітами, підсистема бездавачевої системи автоматичного керування електромагнітним моментом навантаження генератора. Із цих складових сформовано комп'ютерний моделюючий комплекс в імітаційному середовищі MATLAB/Simulink. Проведено дослідження малопотужних ВЕУ з вертикальною віссю обертання як динамічно керованих об'єктів для різної номінальної потужності ВЕУ та отримано нові закономірності роботи малопотужних ВЕУ.

Третій розділ присвячено удосконаленню системи керування підсистемою генерування електричної енергії в автономній електротепловій ВЕУ. У розділі розроблено систему керування електромагнітним навантаженням синхронного генератора з постійними магнітами, яка враховує вплив параметрів навколишнього середовища на аеродинамічну характеристику вітроротора, таким чином підвищуючи енергоефективність роботи ВЕУ в статичних режимах роботи. Система керування ВЕУ містить комбінований коректор завдання електромагнітного моменту, який базується на нечіткій логіці і працює за збуренням швидкості вітру, а також пропорційного регулятора, який діє за відхилення кутової швидкості від заданого значення. Також у цьому розділі досліджено два можливі способи обмеження максимальної потужності ВЕУ за роботи на високих швидкостях вітру, це так звані stall- та feathering-регулювання. Було проведено порівняння роботи даних способів шляхом комп'ютерного симулювання.

Четвертий розділ присвячений створенню та дослідженню підсистеми генерування теплової енергії в автономних ВЕУ. В дисертаційній роботі запропоновано та розроблено три системи керування для електротеплових малопотужних ВЕУ:

1. Квазіоптимальне керування автономною ВЕУ методом періодичного підключення ТЕНів до обмоток якоря синхронного генератора з постійними магнітами.
2. Оптимальне керування ВЕУ з отриманням теплової енергії шляхом низькочастотного імпульсного регулювання навантаження генератора на ТЕНи.
3. Система керування когенераційною ВЕУ для генерування електричної і теплової енергії з використанням електричного і теплового генераторів.

Для останнього було розроблено систему керування роботою нового запатентованого та створеного апарату – електромагнітного перетворювача механічної енергії в теплову – та складено алгоритм керування енергопотоками в когенераційній ВЕУ.

Для кожної системи керування було змодельовано відповідну підсистему в середовищі MATLAB/Simulink та отримано результати імітаційного комп'ютерного симулювання.

У **п'ятому розділі** проведено експериментальні дослідження запропонованих систем енергоефективного керування електротепловими

ВЕУ. Автором було сконструйовано експериментальний стенд когенераційної ВЕУ з фізичним симулятором роботи вітроротора на турбулентному вітрі. Симульований вітровий потік приведений до моменту завдання асинхронного двигуна, який обертає генератор ВЕУ через редуктор. Система керування симулятором реалізована у програмі промислового контролера та забезпечує достатньо точне відтворення роботи ВЕУ в реальних умовах. Результати експериментальних досліджень роботи трьох розроблених систем керування підтвердили їх роботоздатність. Порівняння їх із відповідними результатами імітаційного комп'ютерного симулювання показало достатньо високу збіжність, з похибкою, яка не перевищує 20%.

Загальні висновки по дисертаційній роботі сформовано за основними одержаними науковими результатами. Вони вказують на позитивні сторони запропонованих систем керування електротепловими ВЕУ, а також відмічають їх недоліки, що дало змогу сформулювати основні рекомендації щодо їх використання. Низка висновків підтверджується й кількісними показниками.

Оцінка публікацій, автореферату та оформлення дисертації

Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлені в 11-и наукових працях, 4 з яких автор опублікував самостійно. Кількість публікацій у фахових виданнях відповідає чинним вимогам. Результати дисертації пройшли належну апробацію на численних міжнародних науково-технічних конференціях та семінарах.

Зміст автореферату повністю відповідає основним положенням дисертації.

Дисертація оформлена з дотриманням вимог, написана грамотно.

Зауваження до дисертації

Поряд з позитивними сторонами дисертації, необхідно відмітити низку її недоліків і зауважень:

1. Дисертантом не зазначається, що ВЕУ з вертикальною віссю обертання характерна вища матеріалоемність порівняно ВЕУ з горизонтальною віссю обертання, а відповідно і вища вартість.

2. Враховуючи те, що вартість електричних генераторів за сталої потужності зростає при зменшенні їх кутової швидкості, а вартість мультиплікаторів зростає відповідно їх передавальному числу, то, напевно, існує оптимальне співвідношення, що потрібно враховувати при обґрунтуванні структури ВЕУ.

3. Спірним видається твердження про високу швидкохідність ВЕУ з ВВО, яка в роботі становить близько 3,5, що є меншою від типових трилопатевих

ВЕУ з горизонтальною віссю обертання, в яких цей параметр становить близько 4,5.

4. Не достатньо уваги приділено захисту ВЕУ з вертикальною віссю обертання в умовах надмірних вітрів. Завантаження ВЕУ збільшенням відбору електричної потужності не в повній мірі вирішує її захист.

5. З врахуванням орієнтації розробки на автономні системи енергопостачання, слід було би приділити більше уваги також й іншим електроакумуючим засобам, враховуючи, що хімічні акумулятори мають високу вартість, низький ККД і швидку деградацію.

6. Періодичне навантаження електричного генератора на ТЕНи в запропонованій електротепловій ВЕУ з періодичним навантаженням призводитиме до механічних ударів, які негативно впливатимуть на міцність і довговічність елементів вітроустановки.

7. Розроблені в роботі системи керування електротепловими ВЕУ, які забезпечують ефективний відбір тільки теплової енергії на малих швидкостях вітру, не можна вважати енергетично ефективними. Адже генерування теплоти за малої потужності є менш виправданим, ніж вироблення електроенергії.

8. Оскільки в когенераційній ВЕУ на одному валу з вітроротором встановлено два генератори, це призведе до збільшення сумарного моменту інерції й звідси – до погіршення динамічних властивостей ВЕУ та зростання її стартової швидкості вітру.

Вказані зауваження мають більше рекомендаційний характер та не впливають на загальну високу оцінку дисертаційної роботи Щура В.І.

Висновок

Дисертаційна робота Щура Всеволода Ігоровича на тему «Енергоефективне керування вітроустановками малої потужності для генерування електричної і теплової енергії» є завершеною працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують наукову задачу суттєвого покращення якості автоматичного керування роботи малопотужних ВЕУ, які працюють автономно в умовах низькошвидкісних турбулентних вітрів.

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових та практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків дисертаційна робота відповідає вимогам, які ставляться до кандидатських дисертацій, а за змістом поданого в ній матеріалу – паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Представлена дисертаційна робота відповідає вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій згідно з п.п. 11, 13 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Щур Всеволод Ігорович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Професор кафедри електротехнічних систем
Львівського національного аграрного університету,
кандидат технічних наук, професор



В. М. Сиротюк

Підпис проф. Сиротюка В.М. засвідчую,
головний вчений секретар
Львівського національного
аграрного університету,
канд. біол. наук, доцент



С. А. Різель

19 травня 2017 р.