

Голові спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01
Інституту проблем моделювання в енергетиці
ім. Г.Є. Пухова НАН України
03164, Київ-164, вул. Генерала Наумова, 15

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, старшого наукового співробітника, завідувача відділу гідроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України Васька Петра Федосійовича на дисертаційну роботу Терехова Володимира Євгеновича на тему «Математичні моделі режимів роботи вітротурбін в умовах обмеження потужності генерації», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Станом на початок другого півріччя 2021 року загальна потужність вітроелектричних установок (ВЕУ) в складі об'єднаної електричної системи України (ОЕС) становить близько 1450 МВт. В експлуатації знаходяться вітроелектричні станції (ВЕС) потужністю до 250 МВт включно (Сивашська, Ботієвська). Лише за перше півріччя 2021 року споруджено 278 МВт нових вітроустановок. Функціонування ВЕС характеризується нерівномірністю виробництва електроенергії, зумовленою зміною в часі швидкості вітрового потоку, що спричиняє до введення обмежень з боку диспетчера ОЕС на значення генерованої потужності для забезпечення якості електропостачання споживачів. Із урахуванням того факту, що близько 5000 МВт вітросенергетичних потужностей уже отримали дозвіл на будівництво, можна прогнозувати подальше збільшення тривалості дії обмежень на генеровану потужність ВЕС. Проте введення обмежень слугує причиною зменшення енергетичної та економічної ефективності використання ВЕС в складі ОЕС. Тому розроблення математичних моделей процесу виробництва електроенергії ВЕУ в умовах обмеження потужності генерації ВЕС є актуальним науковим завданням, що досліджується в даній дисертаційній роботі.

2. Загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням і включає анотацію, вступ, 4 розділи, висновки, список використаних першоджерел (100 найменувань) та 4 додатки.

В анотації представлено скорочений зміст дисертаційної роботи по кожному розділу.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження, наведено наукову новизну отриманих результатів і їх практичне значення, показано взаємозв'язок розв'язуваних завдань з науковими програмами досліджень Інституту, надано відомості про публікації та апробації.

У першому розділі розглянуто особливості функціонування промислових ВЕС України в складі ОЕС за умов обмеження генерації, проведено аналіз стану математичного моделювання

Г.М.Е. Вх. 315
01.09.2021р.

процесу виробництва електроенергії ВЕУ та ВЕС, визначено основні задачі дослідження та параметричну модель функціонування ВЕУ для вирішення поставлених задач.

За матеріалами розділу сформульовано два основні напрями дослідження: визначення обсягів втраченого виробітку електроенергії та раціонального розподілу накладеного на ВЕС обмеження на множину складових ВЕУ. Показано, що реалізація досліджень за обома напрямками потребує застосування математичного моделювання кривих потужності ВЕУ з різними діаметрами вітротурбін та розподілу швидкості вітру по висоті приземного шару.

Другий розділ роботи присвячено розробленню математичної моделі узагальненої кривої потужності ВЕУ на основі статистичного аналізу сукупності кривих потужності окремих установок з різними діаметрами вітротурбін.

Результати дослідження представлені функціональною залежністю потужності ВЕУ від швидкості вітру та діаметру вітротурбіни на основі поліному 5-го ступеню.

У третьому розділі розглядаються питання моделювання вертикального профілю швидкості вітру в приземному шарі атмосфери висотою 100 метрів для задач вітроенергетики за результатами експериментальних вимірювань на спеціалізованих метеощоглах.

За результатами синхронних висотних вимірювань швидкостей вітру на різних висотах для умов Північного Причорномор'я отримано оцінку точності різних способів перерахунку розподілу швидкостей вітру до висоти осі вітроколеса ВЕУ, а також похибки відомих емпіричних залежностей. Розроблено новий спосіб визначення прогнозного обсягу виробництва електроенергії ВЕУ на заданій висоті розташування центру обертання вітротурбіни.

В четвертому розділі проведено аналіз точності визначення річних обсягів виробництва електроенергії ВЕС на основі розробленої математичної моделі ВЕУ. Розроблено метод раціонального розподілу обмеження потужності генерації електроенергії ВЕС на множину складових ВЕУ, який враховує ймовірнісний розподіл швидкості вітру та типорозмір ВЕУ для мінімізації обсягів втрат виробництва електроенергії від накладеного обмеження.

У Висновках означено отримані наукові та практичні результати.

Додатки містять таблицю номінальних параметрів 66 сучасних ВЕУ мегаватної потужності, перелік та дислокацію об'єктів промислової вітроенергетики Миколаївської області, список публікацій за темою дисертації, акт про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, наданих у дисертації, їхня достовірність.

Обґрунтованість і достовірність основних результатів дисертації обумовлена коректністю вихідних передумов і прийнятих обмежень, прийнятною збіжністю результатів числових і експериментальних досліджень, порівняльним аналізом відомих і отриманих

автором наукових результатів. Первинні дані отримано з сертифікованих систем збору та накопичення інформації введених в експлуатацію вітчизняних ВЕС. Фактичні результати експлуатації ВЕС також підтверджують обґрунтованість та достовірність розроблених математичних моделей.

Методи дослідження відповідають поставленим задачам і забезпечують достатньо ефективно їх розв'язання та досягнення сформульованої мети роботи.

Наведені аргументи дозволяють визнати достовірними наукові результати, основні положення та висновки прикладних досліджень дисертації.

4. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Вперше розроблено:

– узагальнену математичну модель характеристики потужності ВЕУ, яка являє собою функціональну залежність потужності ВЕУ від швидкості вітру та діаметру вітротурбіни на основі поліному 5-го ступеню;

– математичну модель процесу виробництва електроенергії ВЕУ в заданих вітрових умовах функціонування з урахуванням обмежень на її потужність та технічні параметри;

– метод раціонального розподілу обмеження потужності генерації електроенергії ВЕС на множину складових ВЕУ, який враховує ймовірнісний розподіл швидкості вітру та типорозмір ВЕУ для мінімізації обсягів втрат виробництва електроенергії від накладеного обмеження.

Удосконалено модель вертикального профілю швидкості вітру на основі ступеневих функцій за результатами її синхронних вимірювань на різних висотах в приземному шарі атмосфери.

5. Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях

Основні результати дослідження опубліковані в 30 наукових публікаціях, з них: 8 статей у фахових наукових виданнях (одна у міжнародній наукометричній базі SCOPUS); 19 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій; 3 праці, які додатково відображають наукові результати дисертації, у тому числі 2 патенти на корисну модель.

6. Відповідність дисертації встановленим вимогам

Дисертація оформлена відповідно чинним вимогам: зазначені мета роботи, об'єкт та предмет дослідження, наукове завдання та наукова новизна взаємопов'язані між собою та відповідають темі дисертації. Тема та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи.

7. Наукове значення та практична цінність одержаних результатів

Значення для науки полягає в розробленні нових математичних моделей ВЕУ та промислових ВЕС в умовах обмежень на генеровану потужність за функціонування в складі електроенергетичної системи.

Практична цінність роботи. Розроблені математичні моделі дозволяють раціонально розподілити накладене обмеження потужності генерації ВЕС на множину складових ВЕУ і, тим самим, зменшити обсяги недовиробництва електроенергії із-за обмежень. Результати роботи знайшли застосування на промисловій ВЕС, що підтверджено відповідним актом, наведеним в Додатку.

8. Автореферат дисертації оформлений згідно чинних вимог, його зміст адекватно відображає положення дисертаційної роботи.

9. Зауваження щодо змісту та оформлення дисертаційної роботи

1. Одне з вихідних положень автора стосовно актуальності дисертаційного дослідження, задеклароване у Вступі на стор.21-22 (...В існуючі характеристики потужності завідомо вноситься похибка невизначеності шляхом їх представлення у вигляді таблиць з широким інтервалом дискретності або графіків потужності невеликого масштабу, а сучасна тенденція заміни характеристики ВЕУ на прогнозований річний виробіток ВЕУ за експериментальних умов вимірювання унеможливує точне визначення характеристики потужності), можна вважати дещо неоднозначним і дискусійним. Чинним стандартом ДСТУ ІЕС 61400-12-2001 нормовано експериментальне визначення характеристики потужності ВЕУ протягом року. Можливо накопичений досвід експлуатації потужних ВЕУ свідчить про необхідність корегування деяких положень стандарту?

2. При розробленні математичної моделі залежності потужності ВЕУ від швидкості вітру (крива потужності - КП) автор використовує поліном 5-го ступеню задля визначення потужності для довільного значення швидкості вітру за умови дискретного представлення КП в каталогах вітроустановок. Переваги застосування даного поліному не аргументовані. Зокрема, так як КП являє собою гладку криву, то незалежно від ступеня її дискретизації в різних каталогах, вона може бути апроксимована для довільної нерівномірної сітки значень швидкості вітру шляхом використання кубічних сплайн-функцій, які характеризуються в точках дискретизації неперервністю похідних до другого порядку включно, що дозволяє забезпечити як тренд зміни функції, так і її кривизну на інтервалах дискретизації. Реалізація сплайн-апроксимації дискретно заданої кривої можлива в багатьох пакетах прикладних програм.

3. Розроблена узагальнена характеристика потужності ВЕУ являє собою поліном 5-го ступеню з числовими коефіцієнтами, кількісні значення яких отримані на основі осереднення кривих потужності трьох конкретних установок потужністю 2 МВт з діаметром ротора

вітротурбіни 100 метрів (осереднену криву потужності автор називає опорною, стор. 58 і далі по тексту). Але якщо в якості опорної взяти криву потужності іншої ВЕУ і виконати всі процедури запропонованого алгоритму, то отримуємо інші кількісні значення коефіцієнтів полінома. Це стосується і визначення коефіцієнтів масштабування опорної кривої потужності по горизонталі та вертикалі. Так як в роботі аналізуються 66 різних ВЕУ мегаватного класу потужності, то можна отримати 66 варіантів функціональної залежності узагальненої характеристики потужності ВЕУ, які будуть мати одну форму запису, але різні кількісні значення коефіцієнтів поліному. Тому вибір параметрів опорної ВЕУ потребує детального обґрунтування.

4. Основні зауваження щодо оформлення матеріалів дисертаційної роботи.

4.1 Назва дисертації містить термін "вітротурбіна", проте в меті роботи, об'єкті та предметі, завданнях дослідження і далі по тексту використовується термін "вітроелектрична установка" (ВЕУ).

4.2 У частині розділу наукової новизни "*Набули подальшого розвитку*" наведено лише констатацію фактів без формулювання елементів новизни.

4.3 Надмірно і не цілком обґрунтовано використовується термін "проблема" в назвах 8 пунктів роботи, де розглядаються конкретні задачі.

4.4 Формула (1.2) не відповідає контексту матеріала пункта 1.4. У формулі (1.3), яка описує динаміку обертового руху елементів ВЕУ, момент механічних втрат позначено загальноприйнятним символом для ККД, що ускладнює сприйняття матеріалу.

4.5 Потребує корегування формулювання п.2 висновків до розділу 4 з чітким визначенням причини і наслідків.

4.6 В тексті загальних висновків по роботі відсутня інформація стосовно кількісних характеристик отриманих нових результатів та умов їх застосування.

Зазначені вище зауваження мають дискусійний характер і не впливають на загальний позитивний висновок про роботу.

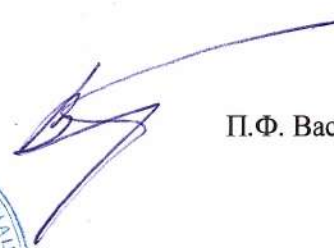
Висновок

Дисертаційна робота Терехова Володимира Євгеновича на тему «Математичні моделі режимів роботи вітротурбін в умовах обмеження потужності генерації», є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати стосовно моделювання процесу виробництва електроенергії ВЕУ в умовах обмеження потужності генерації ВЕС в складі об'єднаної електросистеми України.

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових і 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 відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи.

За науковим рівнем, практичною цінністю, апробацією та публікаціями дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9,10,12,13 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою КМУ №567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ №656 від 19.08.2015 р., №1159 від 30.12.2015 р. та №567 від 27.07.2016 р.), а її автор Терехов Володимир Євгенович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
зі спеціальності перетворювання відновлюваних
видів енергії та установки на їх основі,
завідувач відділу гідроенергетики
Інституту відновлюваної енергетики НАН України



П.Ф. Васько

Підпис д-ра техн. наук, с.н.с. П.Ф. Васька засвідчую
Вчений секретар
Інституту відновлюваної енергетики,
д-р техн. наук



Т.В. Суржик