

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, старшого наукового співробітника, професора кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів та систем теплоенергетичного факультету Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського Верляня Андрія Анатолійовича 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

Особливістю функціонування вітрових електричних станцій (ВЕС) є нерівномірність вітрового навантаження генеруючого устаткування і, як наслідок, нерівномірність потужності генерації електроенергії. Тому експлуатація ВЕС у складі об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України потребує інтенсивного використання потужності наявного регулюючого та маневрового устаткування і часто призводить до необхідності введення обмежень на потужність генерації ВЕС. Додатковими обмеженнями на видачу потужності генерації ВЕС є недостатня пропускна здатність та зношеність електричних мереж, до яких приєднані ці станції. За таких обставин диспетчером ОЕС України часто вводяться обмеження на потужність генерації ВЕС, причому, тривалість дії таких обмежень має тенденцію до збільшення.

Визначення збитків від обмеження потужності генерації ВЕС та вжиття заходів щодо мінімізації таких збитків є вкрай актуальною науково-прикладною задачею.

Отже, постає задача визначення прогнозних втрат обсягів виробітку електроенергії ВЕС, обумовлених величиною встановленого обмеження потужності генерації станції, в залежності від технічних характеристик кожної вітроелектричної установки (ВЕУ) у її складі та особливостей вертикальної характеристики вітрового потенціалу місцевості, на якій розташована така установка.

На сьогодні, за відсутності спеціалізованого програмно-апаратного комплексу керування ВЕС, розподіл накладеного обмеження на складові ВЕУ визначається оператором ВЕС на власний розсуд. Оператор застосовує, наприклад, рівномірний розподіл обмеження потужності генерації ВЕС між ВЕУ або розподіл за номінальною потужністю ВЕУ, що призводить до збільшення втрат обсягу генерації електроенергії.

Таким чином, дисертаційна робота Терехова Володимира Євгеновича є актуальною, оскільки спрямована на вирішення важливої науково-прикладної проблеми в галузі вітроенергетики, а саме розробка математичних моделей вітротурбін, що функціонують в умовах обмеження потужності генерації ВЕС, які дозволяють з достатньою для практики точністю визначати об'єм виробітку електричної енергії в заданих вітрових умовах.

2. Загальна характеристика роботи

В цілому дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, яка включає анотацію, вступ, 4 розділи, висновки, список літератури, що налічує 100 найменувань та 4 додатка.

В анотації представлено скорочений зміст дисертаційної роботи по кожному розділу.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, на основі чого сформульовано наукову проблему, мету й напрямки досліджень. Охарактеризовано наукову новизну отриманих результатів, їх практичну цінність, показано взаємозв'язок розв'язуваних завдань з науковими програмами. Надано відомості про публікації та апробації.

*Ю. П. М. Е. Вх. 309
30.08.2021р.*

У *першому розділі* розглядаються проблеми експлуатації промислових ВЕС України, визначені основні задачі дослідження, визначено особливості впливу обмеження та основних технічних параметрів ВЕУ на генерацію електроенергії ВЕУ (ВЕС), проведено аналіз відомих математичних моделей генерації електричної енергії ВЕУ (ВЕС), визначені їх переваги та недоліки відносно теми дисертаційної роботи та шляхи їх удосконалення.

Ґрунтуючись на результатах дослідження роботи промислових ВЕС України в роботі запропоновано вирішення двох актуальних науково-практичних проблем: це проблеми визначення об'ємів втраченого обсягу виробітку електроенергії та пошуку раціонального розподілу накладеного обмеження на множину складових ВЕУ в забезпечення мінімізації втрат від накладеного обмеження.

Дослідженням встановлено, що розробка надійної та простої математичної моделі функціонування ВЕУ в умовах обмеження потужності генерації ускладнена приховуванням виробниками кривих потужності ВЕУ, що потребує вирішення актуальної задачі визначення кривої потужності ВЕУ за її відомими основними параметрами. Крім того, проблема визначення параметрів вітрового потенціалу на висоті осі розташування вітроколеса ВЕУ за результатами вітрових спостережень далека до вирішення.

Дослідженням доведено, що криву потужності ВЕУ можна з достатньою точністю побудувати на підставі всього двох основних її параметрів: діаметру вітроколеса та величини номінальної потужності генератора.

Вперше розроблено і запропоновано статичну модель функціонування ВЕУ та визначено найбільш впливаючі на її характеристики керовані і некеровані параметри, яка, на відміну від широко поширеної динамічної форми, направлена на визначення експлуатаційних показників роботи ВЕС.

У *другому розділі* роботи розглядається питання вибору математичної основи моделювання кривої потужності ВЕУ за її основними параметрами.

Результати дослідження кривих потужності ВЕУ мультимегаватного класу різного типорозміру (номінальної потужності генератора та діаметру вітроколеса) показали, що зону перехідного режиму роботи кривої потужності ВЕУ одного типорозміру можна наблизити до відповідної зони перехідного режиму роботи ВЕУ іншого типорозміру шляхом проведення її вертикального та горизонтального масштабування. На підставі проведеного масштабування зони перехідного режиму роботи початкової кривої потужності у вигляді поліноміальної кривої 5-го ступеню до кривих потужностей ВЕУ різного типорозміру визначено відповідні коефіцієнти вертикального та горизонтального масштабування та побудовано рівняння лінійної регресії їх залежності від типорозміру ВЕУ.

У *третьому розділі* розглядаються проблеми моделювання вертикальної зміни вітрового потенціалу за результатами вітрових вимірювань.

На підставі результатів синхронних висотних вимірювань швидкостей вітру в умовах Північного Причорномор'я в роботі проведено оцінку точності відомих способів перерахунку розподілу швидкостей вітру до висоти осі вітроколеса ВЕУ, а також достовірності відомих емпіричних залежностей. В результаті досліджень запропоновано спосіб визначення прогнозного виробітку ВЕУ на заданій висоті розташування її вітроколеса за ступеневою залежністю вертикальної зміни умовних її виробітків або середніх потужностей генерації.

В *четвертому розділі* проведено апробацію математичної моделі режимів роботи ВЕУ за фактичними результатами роботи ВЕС України, яка показала достатню точність визначення річного виробітку досліджуваних ВЕС, що задовольняє загальноприйнятим вимогам. В роботі також приділено зіставний аналіз розробленої моделі з теоретичними розрахунками та результатами математичного моделювання за моделлю множинної лінійної регресії, який показав високу точність прогнозування обох моделей.

Особливу увагу приділено розробці моделі раціонального розподілу обмеження потужності генерації електроенергії ВЕС на множину складових її ВЕУ на основі розробленої моделі режимів роботи ВЕУ. Зіставний аналіз запропонованої моделі з відомими способами

розподілу обмеження показав доцільність її застосування в забезпечення мінімізації втрат виробітку електроенергії від накладеного обмеження.

Основні результати та висновки є обґрунтованими на основі системності проведених досліджень.

Загальний обсяг дисертації складає 158 сторінок, в тому числі 115 сторінок основного тексту, включаючи 28 рисунків і 56 таблиць.

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

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів та висновків отриманих у процесі виконання досліджень підтверджена:

Теоретичні положення і отримані наукові результати достатньо обґрунтовані, а їх достовірність забезпечується коректністю постановок задач, а також узгодженням теоретичних результатів з фактичними результатами роботи ВЕС України та проведеними обчислювальними експериментами.

- використанням сучасних методів математичного та комп'ютерного моделювання;
- детальним та всебічним аналізом отриманих результатів;
- узгодженням теоретичних результатів з фактичними результатами роботи ВЕС України та проведеними обчислювальними експериментами;
- достовірністю отриманих результатів, що засвідчено актами впровадження;
- матеріали дисертації доповідались і обговорювались на міжнародних й всеукраїнських науково-технічних конференціях.

4. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Основні наукові результати роботи:

Вперше розроблено:

– математичну модель ВЕУ, яка, на відміну від існуючих моделей, дозволяє розрахувати характеристику потужності ВЕУ за двома основними її параметрами – номінальною потужністю генератора та діаметром вітроколеса;

– статичну математичну модель ВЕУ, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує зв'язок між потужністю генерації установки, накладеним обмеженням на потужність її генерації та технічними параметрами ВЕУ, такими, як номінальна потужність генератора, діаметр та висота осі вітроколеса, що дозволяє визначати обсяги генерації електроенергії в заданих вітрових умовах функціонування ВЕУ;

– метод раціонального розподілу встановленого обмеження потужності генерації електроенергії ВЕС на множину обмежень потужності для складових ВЕУ. На відміну від існуючих методів розподілу обмеження потужності, такий метод враховує особливості вітрового потенціалу конкретної місцевості та технічні параметри кожної ВЕУ, що дозволяє мінімізувати втрати від накладеного обмеження.

Удосконалено процедуру визначення розподілу швидкостей вітру на різних висотах приземного шару атмосфери за результатами синхронних висотних вимірювань вітрових параметрів з використанням існуючих параметрів у вигляді ступеневих функцій.

Набули подальшого розвитку:

- методи математичного моделювання генерації електроенергії ВЕУ;
- методи перерахунку параметрів вітрового потенціалу на задану висоту приземного шару 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 з яких 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 та автореферат оформлені відповідно до існуючих вимог. Викладені у авторефераті мета роботи, об'єкт, предмет дослідження, наукова проблема, пункти наукової новизни та висновки взаємопов'язані між собою та відповідають темі дисертації. Тема та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи.

7. Практичне та наукове значення одержаних результатів

Практична цінність роботи полягає у тому, що розроблена математична модель ВЕС дозволяє:

- визначати очікувані обсяги річної генерації електроенергії в залежності від вітрового потенціалу місцевості, на якій передбачається будівництво ВЕС;
- визначати втрачені обсяги генерації електроенергії від накладеного обмеження потужності генерації електроенергії;
- здійснювати обґрунтований вибір ВЕУ серед вже сконструйованих за техніко-економічними характеристиками, що найбільш повною мірою відповідають заданим вітровим умовам, або замовити виготовлення установки з необхідними конструктивними параметрами в разі її відсутності на світовому ринку;
- раціонально розподілити накладене обмеження потужності генерації ВЕС на множину складових ВЕУ і тим самим зменшити обсяги втраченої електроенергії;
- розроблена математична модель ВЕУ покладена в основу метода визначення вартості виробленої електричної енергії, що дозволило проаналізувати економічну ефективність роботи ВЕС України.

8. Автореферат дисертації оформлений згідно з існуючими вимогами і його зміст адекватно відображає положення дисертаційної роботи.

9. Зауваження до дисертаційної роботи:

1. В дисертації розглядається комп'ютерна реалізація розроблених математичних моделей за допомогою пакетів прикладних програм (MS Excel та MathCAD), як найбільш поширених та зручних для користування, про що сказано лише в самій дисертації, а в авторефераті не згадується.
2. Мало уваги в роботі було приділено дослідженню поведінки застосованих функцій, не визначені області допустимих значень.
3. У другому розділі дисертаційної роботи недостатньо обґрунтовано вибір поліноміальної кривої 5-го ступеню в якості функції для наближення до кривих потужностей.
4. В дисертаційній роботі, окрім розподілу Вейбулла - Гніденка, не розглядаються інші існуючі аналітичні функції, що застосовуються в описанні характеристики вітрового потенціалу

Приведені зауваження не є визначними та не знижують загальний рівень проведених досліджень.

Висновки

1. Дисертаційна робота Терехова Володимира Євгеновича є завершеною науковою працею, що містить нові науково обґрунтовані результати, важливі для ефективного використання в енергетиці.
2. Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих у дисертаційній роботі, має практичну цінність і становить вирішення актуальної науково-прикладної проблеми розробки математичних моделей вітротурбін, що функціонують в умовах обмеження потужності генерації ВЕС, які дозволяють з достатньою для практики точністю визначити об'єм виробітку електричної енергії в заданих вітрових умовах.

3. Дисертаційна робота за змістом відповідає вимогам Паспорту спеціальності 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи.

4. Матеріали дисертації достатньо апробовані, доповідались на міжнародних і всеукраїнських конференціях, висвітлені в 30 наукових публікаціях, з них, 8 статей у фахових виданнях, з них в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз - 1, 19 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, 3 в інших виданнях.

5. Структура дисертації є обґрунтованою.

6. Наведені зауваження не змінюють загальну позитивну оцінку наукової значимості й практичної цінності дисертаційної роботи.

7. 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,
професор кафедри автоматизації
проективання енергетичних процесів
і систем теплоенергетичного факультету
Київського політехнічного інституту
ім. Ігоря Сікорського



Верлань Андрій Анатолійович

Підпис Верланя А.А.



затверджую.

