

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»
за спеціальністю 151 “Автоматизація та
комп’ютерно-інтегровані технології” в галузі
знань 15 “Автоматизація та
приладобудування”
доктору технічних наук, професору
АЛЕКСЄВУ Михайлу Олександровичу

ВІДГУК

офіційного опонента
доктора технічних наук, професора
ПОЛОЖАЄНКА Сергія Анатолійовича
на дисертаційну роботу
ЗИБАЛОВА Дмитра Сергійовича
“АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ
МАЛОПОТУЖНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ”,
яку подано на здобуття
наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”

1. Ступінь актуальності теми дисертаційної роботи

За останні п’ять років в Україні стрімко зросла частка відновлюваних джерел енергії в структурі сучасних енергетичних систем, що зумовлено як технологічним розвитком фотоелектричних установок, так і необхідністю підвищення гнучкості та децентралізації системи генерації енергії. Водночас, для України цей процес набуває особливої значущості в умовах суттєвих порушень стабільності функціонування енергетичної інфраструктури, спричинених наслідками широкомасштабних бойових дій на її території.

Незважаючи на значний прогрес у технологіях фотоелектричного перетворення, ефективність генерації електричної енергії суттєво залежить від сукупності зовнішніх факторів, серед яких ключовими є: кут падіння сонячного випромінювання на площину фотоелектричного перетворювача; поточне положення Сонця на небесній сфері; атмосферні умови, зокрема, рівень хмарності та прозорість атмосфери, а також режим роботи фотоелектричної системи відносно точки максимальної потужності.

У реальних умовах експлуатації зазначені фактори мають виражений динамічний характер і можуть змінюватися в короткі проміжки часу, що призводить до суттєвих втрат енергії при відсутності або недостатній ефективності адаптивних алгоритмів керування орієнтацією фотоелектричних перетворювачів та відстеження точки максимальної потужності. Особливо критичними є ситуації різкої зміни освітленості, зумовлені проходженням хмарних мас або іншими атмосферними явищами, коли існуючі системи

керування не забезпечують оптимального режиму роботи фотоелектричної установки.

У зв'язку з цим, підвищення ефективності функціонування сонячних фотоелектричних систем шляхом розробки та вдосконалення адаптивних алгоритмів керування, які враховують статистичний характер змін освітленості та динаміку положення Сонця, є *актуальною* науково-прикладною задачею. Реалізація таких підходів дозволяє мінімізувати витрати потужності, підвищити стабільність генерації енергії та забезпечити ефективне використання енергії, генерованої фотоелектричним перетворювачем в умовах хмарності, яка, за даними метеорологічних архівів для більшості областей України, спостерігається протягом більшої частини року.

2. Обґрунтованість наукових положень висновків дисертації здобувача

У роботі здобувача отримано сукупність наукових результатів, які, в цілому, спрямовано на підвищення ефективності функціонування автономних фотоелектричних систем шляхом удосконалення методів керування їх просторовою орієнтацією та врахування метеорологічних умов. Зокрема, встановлено важливу особливість роботи фотоелектричних перетворювачів у режимі переважання розсіяної складової сонячного випромінювання, а саме: доцільність горизонтального положення фотоелектричного перетворювача, яке, за певних метеорологічних умов, забезпечує вищу генерацію електроенергії порівняно з класичним режимом стеження за положенням Сонця. Це уточнює межі застосовності традиційних трекінгових підходів і вказує на необхідність адаптивної стратегії керування.

Важливим результатом є удосконалення критерію ефективності роботи автономної фотоелектричної установки, який враховує не лише вироблену енергію, але і супутні енергетичні витрати на переміщення ФЕП та обслуговування системи. Такий підхід є методично більш коректним, оскільки дозволяє оцінювати не номінальну, а фактичну енергетичну доцільність функціонування системи в автономному режимі. Науково значущим є запропоноване використання варіаційної характеристики потужності як інформаційного індикатора хмарності. Це розширює можливості непрямого оцінювання метеорологічних умов без застосування зовнішніх датчиків, що є особливо актуальним для автономних систем із обмеженими ресурсами вимірювання. У роботі здобувача подальший розвиток отримав метод керування просторовим положенням фотоелектричного перетворювача, у якому реалізовано адаптивне перемикання режимів роботи залежно від оціненого рівня хмарності. Такий підхід є концептуально виправданим, оскільки забезпечує компроміс між точністю стеження за Сонцем та енергетичними витратами на переміщення приводу. Розроблена імітаційна модель системи керування є більш повною порівняно з типовими моделями, оскільки враховує одночасно астрономічні фактори, метеорологічні умови, електричні характеристики фотоелектричного перетворювача та енергетичні витрати на керування. Це дозволяє отримувати більш реалістичні оцінки ефективності

роботи різних алгоритмів у порівняльному аналізі. Використання супутникових даних NASA щодо хмарності підвищує достовірність моделювання, оскільки забезпечує наближення до реальних умов експлуатації, а не до синтетично заданих сценаріїв, що є суттєвим для коректності верифікації запропонованих алгоритмів.

Узагальнюючи наведене, слід зазначити, що отримані у роботі результати, в сукупності, формують цілісну методологічну основу підвищення ефективності роботи автономних фотоелектричних систем за рахунок адаптивного керування орієнтацією фотоелектричного перетворювача та врахування змінних метеорологічних умов. Запропонований підхід розширює межі застосування традиційних трекінгових стратегій, підвищує коректність оцінювання енергетичної доцільності функціонування систем та забезпечує ступінь адекватності моделювання реальних умов експлуатації, що підтверджує наукову та практичну значущість виконаного дослідження.

Обґрунтованість і достовірність отриманих у дисертаційній роботі наукових результатів підтверджується аналізом значної кількості наукових джерел, застосуванням комплексу загальнонаукових і спеціальних методів дослідження, а також апробацією результатів на науково-практичних конференціях і публікаціями у фахових виданнях.

3. Характеристика змісту та основних положень роботи

Дисертаційну роботу структурно побудовано за класичною схемою наукового дослідження, а логіка викладу відповідає чинним вимогам МОН України, які висуваються до оформлення кваліфікаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії. Розділи взаємопов'язані, послідовні та цілісні.

Структурно дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі здійснено аналіз існуючих рішень у сфері сонячної енергетики та систем позиціонування фотоелектричних перетворювачів; визначено основні фактори, що знижують ефективність їх роботи, зокрема, вплив кута падіння сонячного випромінювання на поверхню фотоелектричного перетворювача; обґрунтовано необхідність розроблення алгоритму керування просторовим положенням фотоелектричного перетворювача з урахуванням хмарності.

У другому розділі виконано математичне моделювання процесів генерації електроенергії з урахуванням руху Сонця та змін інсоляції; використано астрономічні моделі визначення положення Сонця та модель ясного неба з корекцією за хмарністю; описано електричні характеристики моделі одного діода фотоелектричного перетворювача, що дозволило визначити вольт-амперні характеристики та точку максимальної потужності, а також оцінювати втрати при відхиленні від неї.

У третьому розділі виконано класифікацію погодних умов за рівнем освітленості та обґрунтовано дискретний підхід до керування положенням

системи; досліджено вплив хмарності на стабільність генерації та запропоновано статистичний критерій оцінювання рівня хмарності на основі коефіцієнта варіації; визначено порогові значення для розмежування умов освітленості та розроблено алгоритм адаптивного керування.

У четвертому розділі розроблено експериментальний стенд з двоосьовою системою позиціонування та програмне забезпечення для адаптивного керування положенням у просторі фотоелектричного перетворювача; показано, що запропонований алгоритм не потребує значних обчислювальних ресурсів і складних сенсорних систем; експериментально підтверджено підвищення ефективності генерації електроенергії та досягнення позитивного економічного ефекту. Перевірено на адекватність розроблену модель фотелектричної установки.

Узагальнюючи отримані результати, слід відзначити, що в роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності функціонування автономної малопотужної фотоелектричної установки шляхом удосконалення методу керування її просторовим положенням в умовах змінних метеорологічних факторів. Отримані результати мають системний характер і базуються на поєднанні експериментальних досліджень, статистичного аналізу та імітаційного моделювання. У сукупності отримані результати формують цілісну основу для підвищення ефективності роботи автономних сонячних фотоелектричних установок.

4. Практична значущість результатів дослідження

Отримані результати дозволяють підвищити ефективність функціонування автономних малопотужних фотоелектричних установок за рахунок адаптивного керування просторовим положенням фотоелектричного перетворювача в залежності від поточних умов освітленості та ступеня хмарності.

Запропонований алгоритм дає змогу зменшити витрати електроенергії на неефективне позиціонування фотоелектричного перетворювача.

Розроблений метод оцінки ступеня хмарності на основі статистичних характеристик потужності фотоелектричного перетворювача реалізовано без використання додаткових метеорологічних сенсорів, що спрощує структуру системи керування та зменшує її вартість.

Запропонований підхід адаптивного перемикавання режимів орієнтації фотоелектричного перетворювача придатний для практичного використання як для автономних, так і для розподілених систем електроживлення.

Розроблена імітаційна модель забезпечує можливість дослідження, налаштування та порівняльного аналізу алгоритмів керування в умовах змінної хмарності. Отримані результати можуть бути використані під час проектування енергетичних систем на основі сонячної генерації.

5. Відповідність змісту дисертаційної роботи її темі

У дисертаційній роботі розглянуто питання підвищення ефективності функціонування автономних малопотужних фотоелектричних установок шляхом розроблення адаптивних алгоритмів керування просторовим положенням фотоелектричних перетворювачів з урахуванням умов освітленості та ступеня хмарності. Наведені в роботі наукові положення, результати експериментальних досліджень, математичного моделювання безпосередньо пов'язані з тематикою дисертації та спрямовані на досягнення поставленої мети. У роботі досліджено вплив метеорологічних факторів на ефективність генерації електроенергії, обґрунтовано критерій оцінювання рівня хмарності, розроблено метод адаптивного орієнтування фотоелектричного перетворювача та проведено перевірку ефективності запропонованих рішень. Результати, отримані в ході дослідження, є взаємопов'язаними, логічно завершеними та повністю відповідають темі дисертаційної роботи.

6. Рівень виконання поставленого наукового завдання дисертаційної роботи

У процесі дослідження проведено аналіз факторів, що впливають на ефективність функціонування фотоелектричних установок, досліджено режими орієнтування фотоелектричного перетворювача в просторі та обґрунтовано доцільність використання адаптивного підходу керування положенням фотоелектричного перетворювача залежно від умов освітленості та ступеня хмарності. У роботі запропоновано критерій оцінки рівня хмарності на основі статистичних характеристик потужності фотоелектричного перетворювача та створено імітаційну модель системи керування з урахуванням реальних метеорологічних умов. Проведені експериментальні дослідження та результати моделювання підтвердили працездатність і ефективність запропонованих рішень. Результати, отримані в ході дослідження, є достатньо обґрунтованими, мають практичне значення та свідчать про те, що поставлену в дисертаційній роботі наукову задачу вирішено в повному обсязі.

7. Оволодіння методологією наукової діяльності

У процесі виконання дисертаційної роботи здобувач продемонстрував належний рівень оволодіння методологією наукового дослідження, що проявляється в здатності формулювати наукову проблему, визначати мету і задачі дослідження, обґрунтовувати вибір методів їх вирішення та здійснювати послідовну реалізацію поставлених мети і задач дослідження у межах єдиного наукового підходу. У дисертації використано комплекс методів дослідження, зокрема методи статистичного аналізу, наукового експерименту, математичного та імітаційного моделювання, що забезпечило отримання достовірних і відтворюваних результатів.

Особливу увагу приділено поєднанню теоретичних підходів з практичною реалізацією запропонованих алгоритмів у вигляді моделі системи

керування. Результати, отримані в ході дослідження, свідчать про здатність здобувача до самостійного проведення наукових досліджень, критичного аналізу отриманих даних та формування обґрунтованих висновків, що відповідає сучасним вимогам до рівня наукової кваліфікації.

8. Оцінка академічної доброчесності

Під час виконання дисертаційного дослідження здобувач дотримувався принципів академічної доброчесності, що передбачає самостійність виконання наукової роботи, коректне використання результатів інших дослідників з належними посиланнями на використані джерела інформації.

У дисертації Зибалова Дмитра Сергійовича відсутні ознаки плагіату, фальсифікації або фабрикації даних. Усі запозичення з робіт інших науковців супроводжуються відповідними посиланнями на першоджерела, відповідно до вимог наукового цитування.

Експериментальні дані, результати моделювання та аналітичні залежності отримані здобувачем самостійно. Отримані наукові результати є достовірними, відтворюваними та можуть бути перевірені незалежними дослідниками, що додатково підтверджує дотримання принципів академічної доброчесності в роботі.

9. Повнота викладу результатів дослідження в публікаціях здобувача

Результати дисертаційного дослідження повною мірою відображено в п'яти наукових статтях та представлено на п'яти міжнародних наукових конференціях з публікацією тез. Основні наукові положення, методичні підходи та практичні результати дослідження висвітлено у фахових публікаціях, що відповідають встановленим вимогам до апробації результатів дисертаційних робіт. У публікаціях відображено ключові етапи роботи, зокрема: аналіз впливу метеорологічних факторів на ефективність функціонування сонячних фотоелектричних установок, розроблення та обґрунтування адаптивних алгоритмів керування просторовим положенням фотоелектричного перетворювача, а також результати експериментальних досліджень та імітаційного моделювання.

Опубліковані праці відображають цілісність та завершеність дослідження, а також дозволяють простежити логічний зв'язок між поставленими задачами, отриманими результатами та сформульованими висновками.

10. Зауваження і дискусійні положення

В якості зауважень до дисертаційної роботи слід вказати наступне.

1. Застосування методу Ньютона-Рафсона для розв'язання рівняння моделі одного діода, в цілому, є коректним підходом числового розв'язування нелінійних рівнянь. Разом із тим, у роботі доцільно було б коротко окреслити вибір цього методу у порівнянні з іншими стандартними підходами, наприклад:

методом простої ітерації, методом бісекції, методом хорд чи методом фіксованої точки. Таке порівняння дозволило б більш повно обґрунтувати ефективність вибору методу Ньютона-Рафсона для розв'язування нелінійного рівняння моделі одного діода.

2. У роботі доцільним було б більш чітко розмежування внеску класичних методів сонячного трекінгу та запропонованого адаптивного підходу, що дозволило б більш наочно підкреслити отримані переваги.

3. Потребує певного додаткового пояснення обрання вибіркового коефіцієнта варіації як інформаційного параметра, зокрема, у порівнянні з іншими можливими статистичними характеристиками сигналу потужності, такими як: дисперсія, середньоквадратичне відхилення, медіана, міжквартильний розмах, а також показники асиметрії та ексцесу, що могло б ще більше обґрунтувати його доцільність у запропонованому підході.

4. Доцільно було б розглянути більш детально вплив квантування вимірювальних сигналів на точність прийняття рішень у системі керування, зокрема з урахуванням розрядності аналого-цифрового перетворювача, рівня шумів вимірювального тракту та частоти дискретизації сигналу потужності. Проведення такого аналізу дозволило б більш повно оцінити чутливість запропонованого алгоритму до похибок цифрового вимірювання.

5. Ілюстративний матеріал та графічне представлення результатів дослідження, загалом, є інформативними та достатньо наочно відображають основні залежності і отримані результати, проте, окремі рисунки та таблиці могли б бути більш деталізованими з точки зору розшифрування позначень, одиниць вимірювання та пояснення окремих параметрів. Це дозволило б ще більше полегшити сприйняття матеріалу читачем, а також забезпечити однозначність інтерпретації наведених результатів дослідження.

Слід вказати, що наведені зауваження не знижують позитивного враження від дисертації і, частково, є побажаннями, які варто враховувати у подальшій роботі

Висновок

Дисертаційна робота ЗИБАЛОВА Дмитра Сергійовича, здобувача ступеня доктора філософії, на тему “Автоматизація процесів керування автономними малопотужними фотоелектричними установками” являє собою завершене науково-прикладне дослідження, спрямоване на підвищення ефективності функціонування автономних малопотужних фотоелектричних установок шляхом розроблення та вдосконалення адаптивних алгоритмів керування їх просторовим положенням з урахуванням умов освітленості та ступеня хмарності. Отримані наукові результати є обґрунтованими, логічно узгодженими між собою та базуються на поєднанні експериментальних досліджень, статистичного аналізу та імітаційного моделювання.

Запропоновані методи та алгоритми дозволяють підвищити ефективність відбору сонячної енергії, зменшити втрати, пов'язані з нераціональним позиціонуванням фотоелектричних перетворювачів, та забезпечити адаптацію системи до змінних метеорологічних умов.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання отриманих результатів при проєктуванні та модернізації автономних і розподілених сонячних енергетичних систем. Імітаційна модель та розроблені алгоритми можуть бути застосовані для аналізу, налаштування та порівняльного оцінювання різних стратегій керування. У сукупності дисертаційна робота відповідає встановленим вимогам, а поставлені наукові задачі розв'язано у повному обсязі. Отримані результати мають наукову новизну та практичну цінність і можуть бути рекомендовані до подальшого використання в дослідницькій та інженерній практиці.

За змістом, структурою, обсягом проведених досліджень та рівнем оформлення дисертація загалом відповідає вимогам “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами № 507 від 03.05.2024 р.) та вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. “Про затвердження вимог до оформлення дисертації”.

Враховуючи зазначене вище, доходжу висновку, що ЗИБАЛОВ Дмитро Сергійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 “Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології”.

Офіційний опонент:

Завідувач кафедри комп'ютеризованих
систем та програмних технологій
Національного університету
«Одеська політехніка»,
доктор технічних наук, професор

Сергій ПОЛОЖАЄНКО