

Голові разової спеціалізованої вченої ради  
Національного технічного університету  
«Дніпровська політехніка»  
доктору технічних наук, професору  
Півняку Геннадію Григоровичу

**ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА**  
**кандидата технічних наук,**  
**доцента Рогози Михайла Валентиновича**

на дисертаційну роботу  
Цигана Павла Сергійовича  
на тему

**«Енергетична ефективність режимів розподільних мереж  
фотоелектричних станцій»**

подану на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань  
14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141. Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

Відгук підготовлено на основі вивчення тексту дисертації, наукових публікацій здобувача, в яких опубліковано результати дисертаційного дослідження, документів із підтвердженням впровадження результатів дослідження у інженерну практику проектування фотоелектричних станцій.

*1. Обґрунтування актуальності теми дисертації, її зв'язок із науковими програмами, темами*

Забезпечення енергетичної ефективності режимів розподільних мереж фотоелектричних станцій є важливим аспектом їх експлуатації у зв'язку з постійним зростанням встановленої потужності та обсягів генерації, зважаючи на тенденції енергетичного переходу та низьковуглецевого розвитку енергетики. Обладнання розподільних мереж фотоелектричних станцій експлуатується в специфічних умовах роботи, викликаних систематичною різкозмінністю режимів їх завантаження протягом доби і сезонів року. Неврахування аспектів режимів роботи ФЕС може стати причиною надмірного завищення параметрів застосованого обладнання їх розподільних мереж та неефективного використання, як це характерно для традиційних систем електропостачання промислових підприємств та міст. До того ж, фотоелектричні станції містять у своєму складі значну кількість інверторних перетворювачів, які працюють в аналогічних нестаціонарних режимах та спричиняють виникнення гармонійних складових струму і відповідні

додаткові втрати електричної енергії в обладнання розподільних мереж. Розробка та впровадження адекватних методологічних підходів щодо проектування і вибору раціональних параметрів обладнання розподільних мереж сонячних станцій є важливим аспектом для підвищення їх енергетичної ефективності, особливо при збільшенні масштабів розвитку фотоелектричних систем.

Таким чином, тема кваліфікаційної роботи Цигана П.С. є актуальною та відповідає потребам розвитку науки й практики щодо підвищення енергетичної ефективності режимів розподільних мереж фотоелектричних станцій. З урахуванням визначеної проблематики та актуальності раціонального розвитку сонячної енергетики, автором було сформульовано мету, завдання та методи дослідження. На основі проведених досліджень енергетичної ефективності класичних розподільних електричних мереж, здобувачу вдалося застосувати певні принципи для ФЕС, з отриманням нових закономірностей та наукових результатів та врахуванням специфіки роботи сонячних станцій й комплексу характерних значущих факторів, що впливають на ефективність вибору та експлуатації основного електрообладнання ФЕС.

Автором виконано аналіз реальних режимів роботи мережевих фотоелектричних станцій різної одиничної потужності, які експлуатуються, а також проведено стендові експериментальні дослідження, у лабораторних умовах, що підсилює адекватність отриманих у подальшому результатів.

Дослідження за темою дисертації виконано відповідно до планів науково-дослідних робіт НТУ «Дніпровська політехніка», зокрема, доцільно виділити наступні: ГП-508 «Методи та засоби енергоефективного розподілу та споживання електроенергії на основі концепції «Smart grid» (2021-2022 рр.) (№ держреєстрації 0115U002296); госпдоговори «Визначення електромагнітної сумісності елементів приводу головної вентиляційної установки ВРПД - 4.5 СМ шахти ім. героїв космосу ВСП "Шахтоуправління імені Героїв Космосу" ПрАТ "ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ"» (2023 р., №0722272); «Дослідницькі послуги щодо вимірювання показників якості електричної енергії для об'єкта системи електропостачання» (2023 р., №0722283), у яких автор брав участь як виконавець.

*Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна*

У дисертаційній роботі поставлено та вирішено наукову задачу, яка полягає у підвищенні енергоефективності режимів фотоелектричних станцій шляхом встановлення закономірностей впливу вищих гармонік струму, викликаних нестаціонарними режимами роботи мережевих інверторів з урахуванням специфічного характеру графіків генерації, на режими роботи та ефективність вибору обладнання розподільної мережі, що дозволяє забезпечити раціональні параметри електротехнічного комплексу, зниження втрат електроенергії та електромагнітного збитку.

Для вирішення наукової задачі сформовано та визначено завдання

дослідження визначено об'єкт і предмет дослідження (стор. 15-16), його мету (стор. 16).

Належний ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність підтверджується коректністю допущень і початкових умов, прийнятих у математичних моделях, їх відповідністю завданням моделювання та умовам експлуатації електрообладнання ФЕС, використанням даних репрезентативної вибірки щодо фактичних режимів роботи обладнання ФЕС; результатами зіставлення теоретичних і експериментальних досліджень, проведених в реальних умовах із застосуванням сучасного вимірювального комплексу ЦККНО «Інноваційна геоенергетика»; позитивним досвідом впровадження результатів роботи.

Для дисертації характерна системність та ясність викладення матеріалу, вміння виділити суттєві моменти, чітка їх аргументація.

Основні результати, отримані у роботі, володіють науковою та практичною значимістю.

1. Автором встановлено характерні спектри та амплітуди вищих гармонічних складових залежно від рівня завантаження інверторного перетворювача та запропоновано відповідну математичну модель оцінки впливу електромагнітної обстановки в стаціонарному і динамічному режимі роботи ФЕС на параметри застосованого обладнання розподільної мережі та втрати електричної енергії в ній.

2. Розроблений спосіб зниження рівнів електромагнітних завад, що спричиняються перетворювачами фотоелектричних станцій, схемотехнічне рішення та алгоритм довантаження мережевих інверторів в нестационарних режимах сприятимуть покращення їх електромагнітної сумісності та підвищення енергоефективності роботи розподільних електричних мереж з відповідними децентралізованими джерелами.

3. Вдосконалений методологічний підхід щодо вибору номінальної потужності силових трансформаторів та ліній електропередачі ФЕС, яка, на відміну від існуючих, враховує фактичні параметри режимів роботи обладнання, тип та характеристики фотоелектричних модулів, теплову інерційність індивідуальних елементів системи, вплив інсоляції та електромагнітного середовища дозволяє застосувати раціональні типорозміри силових трансформаторів та ліній електропередачі та сприяє зниженню капітальних і експлуатаційних витрат у розподільній мережі ФЕС при проектуванні.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у ТОВ «ЕДС-Проект», розроблені заходи та підходи використовуються в освітньому процесі на кафедрі електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» в рамках дисциплін «Моделювання об'єктів електроенергетики», «Сонячна енергетика», «Інтелектуальне електропостачання Smart Grid в системах розподіленої генерації» при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Наведена вище аргументація дозволяє зробити висновок, що здобувач

продемонстрував належний рівень оволодіння методологією наукової діяльності, а поставлене наукове завдання успішно виконано.

## *2. Оцінка змісту роботи та повноти викладу результатів дисертації в опублікованих працях*

Структурно дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку посилань, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 142 сторінки, з них 140 – основний текст, список використаних джерел налічує 42 найменування.

Структура роботи є збалансованою, матеріал викладений логічно та послідовно, загальноприйнятою термінологією. Детальне вивчення тексту дисертації дає підстави стверджувати про глибоке розуміння проблематики та завдань, поставлених для вирішення, а підхід до викладу отриманих результатів дослідження відзначається системністю та ґрунтовністю опрацювання матеріалу за темою роботи.

*Розділ 1.* Автором описано та проаналізовано проблеми та особливості режимів розподільних мереж. Визначено проблематику та тенденції розвитку систем електрозабезпечення в Україні. Оцінено особливості розвитку та особливості роботи сонячних станцій в електричних мережах. Розглянуто режими генерації електричної енергії та завантаження електрообладнання розподільних мереж ФЕС. На основі визначеної проблематики щодо неефективного завантаження обладнання розподільних мереж ФЕС автором сформульовано основні задачі дослідження для вирішення у роботі.

*Розділ 2.* Розглянуто електромагнітну сумісність режимів роботи ФЕС та встановлено закономірності впливу режиму завантаження інверторних перетворювачів на характер і рівні генерації ними вищих гармонік струму. Представлено спосіб підвищення рівня завантаження мережевих інверторів з метою покращення режимів їх роботи за показниками коефіцієнту викривлення синусоїдальності кривої струму, а також запропоновано і реалізовано апаратну частину і алгоритм роботи системи довантаження інвертора.

*Розділ 3.* Представлено методологію ефективного вибору обладнання розподільних мереж ФЕС з урахуванням комплексу значущих факторів, що впливають на режим завантаження обладнання розподільної мережі. Розроблено методологічні підходи та алгоритм вибору раціональної трансформаторної потужності фотоелектричних станцій і типорозмірів кабельних ліній електропередачі в умовах специфічної електромагнітної обстановки та фактичних режимів роботи обладнання мережі.

*Розділ 4.* У розділі виконано оцінку значень і рівнів додаткових втрат, що спричиняються характерними режимами роботи інверторів, а також потенційного економічного ефекту від застосування методологічного підходу щодо вибору раціональної трансформаторної потужності.

Основні наукові результати, які отримано здобувачем дисертаційного дослідження опубліковано у 19 друкованих працях, з них 9 – статті у фахових виданнях (у тому числі 1 – у виданнях, які включено до наукометричної бази

Scopus, 2 – до наукометричної бази Index Copernicus), 9 – матеріали наукових конференцій.

Отримані результати достатньо повно відображені у наукових працях, наведених автором та відповідають основним висновкам кваліфікаційної роботи.

### *Значення роботи для науки і практики*

Результати дисертаційного дослідження мають важливе наукове та практичне значення для галузі електричної інженерії:

– наукове значення роботи полягає у визначенні гіперболічного характеру залежності між рівнем завантаження мережевих інверторів та рівнем спотворення форми кривої струму мережевого інвертора.

– практичне значення роботи полягає в уточненні методики вибору основного обладнання розподільних мереж фотоелектричних станцій.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у ТОВ «ЕДС-Проект» та освітньому процесі на кафедрі електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

### *3. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності*

За результатами вивчення тексту дисертації, наукових публікацій здобувача, а також звіту, щодо перевірки тексту дисертаційної роботи за допомогою онлайн сервісу перевірки на плагіат Unicheck, наданого відповідно до пп. 4.2.5 затвердженого Положення про систему запобігання та виявлення плагіату Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», не виявлено порушення автором принципів академічної доброчесності. Усі результати дослідження, що виносяться на захист, отримані особисто здобувачем, є його власним здобутком. Дисертація є закінченою науковою працею, що відповідає профілю спеціальності 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

### *4. Дискусійні положення та зауваження щодо змісту оформлення дисертації*

У цілому дисертація справляє позитивне враження, проте є необхідність сформулювати деякі зауваження.

#### **Зауваження до роботи.**

1. Автору доцільно було б надати більш детальне техніко-економічне обґрунтування вартості схемотехнічних рішень способу довантаження мережевого інвертора та його реалізації, у тому числі з урахуванням окупності заходу.

2. З тексту дисертаційної роботи не повністю зрозуміло, наскільки універсальними є запропоновані методологічні підходи щодо вибору раціональних параметрів електротехнічного комплексу ФЕС.

3. З наведеного алгоритму вибору раціональної потужності

трансформаторного парку ФЕС незрозуміло, які коефіцієнти не потрібно враховувати у випадку застосування програмного продукту PVSyst, який зазначено автором у якості альтернативи.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017р. №40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами). Наукові положення, що виносяться на захист є достатньо обґрунтованими.

### 5. Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертація П.С. Цигана на тему «Енергетична ефективність режимів розподільних мереж фотоелектричних станцій», подана на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», є завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено наукову задачу, яка полягає у підвищенні енергоефективності режимів фотоелектричних станцій шляхом встановлення закономірностей впливу вищих гармонік струму, викликаних нестационарними режимами роботи мережевих інверторів з урахуванням специфічного характеру графіків генерації, на режими роботи та ефективність вибору обладнання розподільної мережі, що дозволяє забезпечити раціональні параметри електротехнічного комплексу, зниження втрат електроенергії та електромагнітного збитку.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені наказом МОН України №40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами) та «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.

Здобувач Циган Павло Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.



#### Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,  
професор кафедри електроенергетики  
Національного технічного університету  
«Дніпровська політехніка»

Михайло РОГОЗА