

**ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
**Комара Вячеслава Олександровича**  
на тему «Оцінювання якості функціонування електричних мереж  
з відновлюваними джерелами енергії»,  
що представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

**1. Актуальність теми дисертації**

Активна розбудова об'єктів електричної генерації на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є одним з головних напрямів розвитку сучасної енергетики. Зокрема, широке впровадження відновлюваної енергетики є предметом ряду міжнародних угод та зобов'язань України. До таких зобов'язань відносяться і Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року від 2014 року, яким передбачено зростання частки ВДЕ в загальній генерації до 11%, і Паризька кліматична угода від 2015 року, що передбачає зобов'язання зі скорочення шкідливих викидів в атмосферу за рахунок в тому числі використання відновлюваної енергетики. Енергетична стратегія України на період до 2035 року передбачає зростання частки електричної енергії з таких ВДЕ, як сонячна, вітрова та гідроенергетика, до 20%, і цей обсяг багатьма експертами вважається заниженим. Стратегією також планується виконати заходи з інтеграції ОЕС України до енергосистеми ENTSO-E. Однак зростання частки ВДЕ вимагає посиленої уваги до можливостей енергосистеми із забезпечення належної надійності та якості електричної енергії, що відповідали б міжнародним нормам.

Однією з відмінностей відновлюваної енергетики є її розосереджений характер стосовно географічного розташування та відповідного приєднання до енергетичної інфраструктури. Сонячні та вітрові електростанції мають блочну структуру, впроваджуються порівняно малими обсягами і мають низьку щільність порівняно з традиційною енергетикою. Так, велика за сучасними мірками ВЕС чи СЕС співмірна по потужності з одним блоком традиційної ТЕС і значно менша блоків АЕС, займаючи при цьому значно більшу територію. Це ж стосується малих ГЕС. Тому енергосистемам з високою інтеграцією ВДЕ притаманна значна частка розосередженої генерації, що працює безпосередньо в розподільчих мережах. Однак змінний і слабо прогнозований в короткостроковій перспективі характер видачі потужності, властивий вітровій та сонячній енергетиці, може привести до негативного впливу на режими роботи енергосистеми. Це, зокрема, стосується забезпечення збалансованості та стійкості динамічних процесів в системах електропостачання та відповідно організації диспетчерського управління енергосистемами. Крім того, збільшення частки вітрових і сонячних електростанцій буде витіснити традиційні електростанції, що ускладнить можливість регулювання частоти та напруги в енергосистемі, особливо локальній, що важливо для недостатньо гнучких енергосистем зі значним рівнем впровадження вітрової та сонячної енергетики.

Серед інших проблем важливими і актуальними можна вважати: неоптимальні режими роботи мережі, пов'язані зі стохастичним характером генерації; можливість появи зворотного потоку потужності в електричній мережі; оскільки сучасні ВЕС, як і СЕС, підключаються до розподільних мереж через інвертори, які зазвичай спроектовані для роботи в певних межах напруги і частоти, при небалансі потужності може відбутись відключення від мережі та втрата «зеленої» енергії навіть при сприятливих погодних умовах; інвертори також сприяють появі відхилень від синусоїдальної форми та появі вищих гармонік напруги.

Існуюча методологія оцінювання якості функціонування енергосистеми побудована на аналізі множини чинників, які впливають на окремі складові функціонування локальних енергосистем (ЛЕС). Оскільки така задача є багатовекторною, трактування отриманих результатів викликає певні складності. Виникає необхідність створення єдиних теоретико-методологічних основ оцінювання, забезпечення і підтримання якості функціонування ЛЕС шляхом розроблення оптимальних стратегій розвитку електричних мереж при інтегруванні ВДЕ. Цим обумовлено науково-практичну проблему, шляхи розв'язання якої складають зміст дисертаційного дослідження.

В дисертаційній роботі Комара В.О. проведено роботу з розроблення методів і математичних моделей для оцінювання стану ЛЕС і порівняння їх функціональної готовності, порівняльної оцінки якості функціонування електричних мереж за множиною показників та визначення інтегрального показника, що є актуальною задачею для прийняття рішень з розвитку електричних мереж в умовах розбудови відновлюваних джерел енергії.

## **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами**

Дисертація виконана в плані наукових досліджень кафедри електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за кількома держбюджетними темами. Зокрема автором вказано п'ять тем, в яких він брав участь як виконавець. За держбюджетною темою «Інтегрування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в електричні мережі для підвищення їх енергоефективності з використанням SMART GRID технологій» та ще двома госпдоговірними темами автор брав участь як відповідальний виконавець. Зазначені теми стосуються в тому числі дослідження локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії, що безпосередньо пов'язано з темою дисертації.

## **3. Наукова новизна отриманих результатів**

Проведений комплекс досліджень дозволяє здійснити теоретичне узагальнення і розв'язати науко-технічну проблему, яка полягає у розробленні методів і засобів для оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії в процесі їх перспективної розбудови та експлуатації.

Серед зазначених автором результатів, які оцінюються як отримані вперше, можна зазначити:

– розроблення теоретичних основ і принципів оцінювання якості роботи електричних мереж з розподіленими відновлюваними джерелами енергії, за-

вдяки чому було запропоновано інтегральний показник якості функціонування мереж;

– методологічний підхід для математичного опису функціонування зазначених електричних мереж за рахунок поєднання теорії подібності та теорії марковських процесів, що дозволило формалізувати інтегральний показник якості;

– методи оцінювання окремих складових інтегрального показника якості, які дозволяють об'єктивно оцінювати відхилення показників від оптимального їх значення та давати порівняльну оцінку різних конфігурацій електричних мереж;

– теоретичне обґрунтування принципів розпізнавання конкурентоспроможних стратегій розвитку електричних мереж для побудови методів пошуку оптимальних стратегій розвитку, придатних для розв'язання практичних задач.

Ряд використаних автором методів набули подальшого розвитку, зокрема метод визначення оптимальних параметрів та розташування відновлюваних джерел енергії та аналізу чутливості до зміни параметрів електричних мереж, метод визначення потужності резерву в електроенергетичній системі, метод визначення оптимальної стратегії розвитку електричної мережі в цілому.

#### **4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень і результатів**

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації досить обґрунтовані. Теоретичні дослідження базуються на використанні прийнятних методів теорії подібності й моделювання, теорії марковських та суміжних процесів, методів статистичного аналізу, лінійного й нелінійного програмування, зокрема багатокритеріальної оптимізації. Для опису математичних моделей та формування обчислювальних алгоритмів використано матричну алгебру, теорію графів, декомпозицію та об'єктно-орієнтований аналіз. Технічні характеристики роботи електричних систем досліджено за допомогою сучасних цифрових імітаційних моделей. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджено обчислювальними експериментами для реальних електричних мереж.

По кожному з розділів дисертації зроблено окремі висновки, а в заключній частині наведено узагальнюючі висновки. Висновки є обґрунтованими, логічно завершеними та впливають зі змісту дисертації. Зокрема, у висновках (їх 15 пунктів) відображено результати вирішення поставлених задач (яких визначено 9).

#### **5. Наукове значення та практична цінність**

На підставі виконаних досліджень автором вирішено актуальну задачу підвищення якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами. Зокрема, розроблено засоби вибору оптимальних стратегій розвитку, алгоритми та програмну реалізацію методів вибору оптимальних потужностей. Це стосується аналізу впливу відновлюваних джерел енергії на якість функціонування електричних мереж, узгодження споживання та генерування в локальній електричній системі, аналізу і обґрунтування технічних умов на приєднання джерел генерування, кількісного оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. Результати роботи передані для дослідної експлуатації в електропостачальні компанії, та реалізовані в про-

грамних засобах, на які отримано документи щодо захисту авторських прав. Впровадження результатів дисертаційної роботи реалізовано в ТОВ «Подільський енергоконсалтинг», ТОВ «Енергоінвест», ПАТ «Вінницяобленерго», що підтверджено довідками про впровадження, зазначено одержаний економічний ефект. Матеріали дисертації використано також в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету.

#### **6. Повнота викладення результатів в опублікованих роботах**

Матеріали дисертаційної роботи опубліковані у 44 друкованих наукових працях, з них 2 монографії, 24 статті у наукових фахових виданнях України й 10 статей у періодичних виданнях іноземних держав, серед яких 6 статей у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science та Index Copernicus, дві у наукових періодичних виданнях України, 6 публікацій у збірниках матеріалів та тез наукових конференцій. Крім того, отримано один патент на корисну модель, три свідоцтва про реєстрацію авторського права на програмні продукти, які розроблені за результатами досліджень. Зазначені публікації видано у співавторстві, щодо них вказано доробок автора дисертації. Зміст публікацій відповідає матеріалам, викладеним у дисертації.

Основні положення роботи та її результати доповідались на десяти міжнародних науково-технічних конференціях та семінарах.

#### **7. Зміст дисертації та її завершеність**

Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел (200 найменувань) і семи додатків. Основний зміст викладений на 304 сторінках друкованого тексту, що відповідає існуючим вимогам (наказ МОН України від 12.01.2017 № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації»).

**Вступ** містить обґрунтування актуальності теми дисертації, зв'язок роботи з науковими програмами та темами, мету та задачі дослідження, використані методи, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведені відомості щодо апробації роботи, особистий внесок здобувача і публікації.

**В першому розділі** розглянуто інтегральне оцінювання якості функціонування електричних мереж в сучасних умовах, зокрема існуючу проблематику щодо забезпечення якісного електропостачання, використання засобів кваліметрії, оцінку функціональної готовності електричних мереж. Запропоновано математичну модель інтегрального показника якості з використанням теорії подібності і марковських процесів, досліджено закони розподілу часу виникнення відмов і відновлень. Апробування моделі виконано з використанням статистичних даних добової потужності генерування електроенергії ВДЕ та потужності навантаження для конкретної локальної енергосистеми (підстанції «Ямпіль 110/10 кВ»).

За результатами зроблено висновки про необхідність підвищення вимог до надійного забезпечення якісною електричною енергією. Визначено доцільність розроблення методу оцінювання рівня функціональної готовності електричних мереж внаслідок особливостей засобів кваліметрії, що ускладнюють розв'язання задач оцінювання якісного електропостачання. Обумовлено потребу в розробленні методу, який би дозволив визначати інтегральний показник, та

запропоновано теоретичні засади оцінювання «ідеальної» мережі для отримання загальної методології. Показано можливість застосування результатів попередніх робіт автора, хоча матеріали кандидатської дисертації при цьому безпосередньо не використовувалися.

**В другому розділі** виконано моделювання складових інтегрального показника якості функціонування електричних мереж. Наведено загальні положення оцінювання структурної та балансової надійності в електричних мережах. Для побудови інтегрального показника якості мереж з відновлюваними джерелами енергії застосовано моделі Вейбул-Маркова. Математичне моделювання режимів електричних мереж передбачало оцінку режиму мінімальних втрат електричної енергії, врахування імовірнісних характеристик генерування ВДЕ і споживання, врахування балансової надійності і технологічних втрат, показників якості електричної енергії, їх урахування в інтегральному показнику. Результати моделювання проілюстровано на реальному прикладі, що використовувався в попередньому розділі.

**В розділі** пропонується виконувати декомпозицію процесу функціонування шляхом розбиття на стани, які відповідають структурі електричної мережі і стану її елементів. Формування графу станів і подальший аналіз структурної надійності мереж виконується засобами теорії марковських процесів. Враховано стохастичний характер режиму генерування, розроблено підхід для визначення характеристик імовірнісного процесу. Дано теоретичні засади визначення «ідеального» режиму, які ґрунтуються на застосуванні принципу найменшої дії та теорії подібності. Використання такого підходу дозволяє звести оцінювання складових економічності та якості електричної енергії до аналізу струмів, потужностей у вузлах приєднання споживачів та джерел енергії.

**У третьому розділі** продемонстровано на конкретних прикладах методику визначення інтегрального показника якості функціонування локальної електричної системи з відновлюваними джерелами енергії. Запропоновано врахувати індивідуальні режими споживання електроенергії, переважної ролі певних складових в забезпеченні бажаного рівня електропостачання. Це врахування виконується шляхом введення вагових коефіцієнтів для кожної складової інтегрального показника, що дозволяє виділити складові якості функціонування, які є визначальними для споживача – надійність, втрати електроенергії чи якість електроенергії. Запропонований метод оцінювання інтегрального показника якості дозволяє перейти від векторного оцінювання до скалярного, що дозволяє спростити розв'язання експлуатаційних та проектних задач. Показано методику переходу від відносних оцінок до вартісних з подальшим переходом до техніко-економічного розрахунку. Визначено напрямки для подальшого планування заходів з метою підвищення рівня якості функціонування електричних мереж. В розділі показані приклади програмної реалізації розроблених алгоритмів визначення складових якості функціонування. Отримані результати комплексного розв'язання проектних та експлуатаційних задач підтверджують можливість розроблення методів визначення оптимальних стратегій розвитку електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії на основі інтегрального показника якості.

**Четвертий розділ** присвячений визначенню оптимальної стратегії розвитку електричних мереж з відновлюваними джерелами та методам розв'язання задачі оптимального розвитку мереж за критерієм якості. Розглянуто проблеми розмірності таких задач при формуванні динамічної моделі розвитку електричних мереж. Отримано умови оптимальності, за якими можна вибрати оптимальну стратегію розвитку з множини можливих. Розроблено метод, який ґрунтується на отриманих умовах оптимальності. Оптимальна стратегія вибирається шляхом порівняння можливих схем електричної мережі, які відповідають графу станів її функціонування. Визначено умови доцільності реконструкції електричних мереж, вибору пріоритетних напрямків капіталовкладень, зокрема під час розбудови відновлюваних джерел енергії. Вдосконалено метод визначення оптимальної стратегії розвитку електричної моделі, який ґрунтується на побудові динамічної моделі, що враховує часові і просторові зв'язки. Запропонований підхід дозволяє застосовувати принцип оптимальності динамічного програмування і реалізувати алгоритм відшукування оптимальної стратегії розвитку. Вибір оптимальної стратегії виконується за критерієм якості функціонування. Отримано умови оптимальності, що являють собою відношення приростів вартості заходів, які виконуються на певному кроці, та якості функціонування в стані, до якого призвели виконані заходи. Приклади розрахунків показують доцільність використання комплексного оцінювання варіантів розв'язання як проектних, так і експлуатаційних задач.

У **п'ятому розділі** висвітлені проблеми розбудови відновлюваних джерел енергії за сучасного стану електричних мереж, коли ВДЕ використовуються як засіб підвищення якості функціонування розподільних електричних мереж. Оцінено вплив генерування сонячної електростанції на якість ЛЕС на прикладі схеми електричних мереж Ямпільського району. Порівнюються графіки генерування потужності з графіком споживання, оцінено додаткове завантаження електричних і вплив на якість їх функціонування. Запропоновано методи оцінювання імовірнісних характеристик ВДЕ. Вдосконалено метод визначення оптимальної встановленої потужності відновлюваного на основі використання інформації про об'єм, графік споживання і доступні точки приєднання об'єктів генерування.

Проведено аналіз можливих джерел резервування з огляду на забезпечення достатнього рівня якості електропостачання. Розглянуто можливість використання засобів накопичення електричної енергії для наближення графіка генерування до графіка споживання. Проведено математичне моделювання процесу накопичення та надано рекомендації щодо обсягу та місць встановлення акумуляторів. Застосування систем накопичення дозволило знизити об'єм резерву. Розроблено метод корегування графіків споживання для визначення графіку навантаження, який буде мати найбільший ефект для забезпечення якості функціонування мереж, зокрема з залученням технології «розумних» мереж. Запропоновано алгоритм реалізації методу, який дозволяє врахувати в тому числі і економічну складову.

Розглянуто можливість застосування ВДЕ з інверторним обладнанням для впливу на режим мережі по реактивній потужності. Проведене моделювання

і натурні експерименти продемонстрували технічну можливість реалізації такого режиму роботи відновлюваних джерел.

У шостому розділі розглянуто питання сучасного стану інформаційного забезпечення в електричних мережах України та проблем практичного вирішення задачі оцінювання якості функціонування електричних мереж, Розглядаються також перспективи впровадження технологій Big Data та Smart Grid («розумних мереж»). Розділ стосується розв'язання проблеми обмеженого об'єму і якості вихідної інформації.

Проведено аналіз наявних джерел вихідної інформації для оцінювання якості функціонування електричних мереж з ВДЕ. Проведений аналіз інформаційного забезпечення в розподільних електричних мережах показав, що найкращим джерелом інформації є автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Інші варіанти отримання інформації □ розрахунків за характерним режимом (середніх навантажень) або імітацією режимів за графіками, при цьому найчастіше типові графіки є не для всіх споживачів. Серед розглянутих найточнішим визначено підхід, що ґрунтується на імітації режимів за графіками генерування та споживання. На прикладі двох варіантах розвитку електричної мережі показано переваги розвитку в напрямку впровадження нових технологій. Запропоновано архітектуру системи моніторингу та керування, яка сприяє впровадженню Smart Grid технологій. Така система дозволяє забезпечити оцінювання якості функціонування за сучасного рівня засобів інформаційного забезпечення.

Розглянуто проблему врахування технічних обмежень та багатокритеріальності в задачі оптимального розвитку електричних мереж та запропоновано методи її вирішення, зокрема запропоновано використовувати метод штрафних функцій. Досліджена оптимізація електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії за критерієм якості функціонування.

Наведені результати натурального експерименту на об'єктах відновлюваної енергетики з визначення рівня спотворення ними кривої струмів та напруги. Об'єктом дослідження були електричні мережі Ямпільських РЕМ. Ці результати дозволили провести моделювання і розрахунки рівнів якості функціонування електричних мереж з ВДЕ для різних заходів, що проводились для покращення складової економічності. Показано доцільність застосування сонячних електростанцій для регулювання перетоків реактивної потужності.

У висновках узагальнено основні наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі.

Список використаних джерел містить 200 посилань, в тому числі 29 англomовних.

Розділи дисертації логічно пов'язані між собою і є цілісним дослідженням. Дисертаційна робота та автореферат написані з використанням сучасної наукової термінології, чітко і зрозуміло висвітлюють методи досліджень та отримані результати. Зміст автореферату повно відображає зміст дисертації, а основні наукові положення, що містяться в них, ідентичні.

## 8. Зауваження

1. Назва дисертації вказує на дослідження впливу відновлюваних джерел енергії, при формулюванні проблематики також вказується на використання сонячного потенціалу, гідро- та вітроресурсу регіону як мінливих ресурсів. Однак практичний аналіз та натурні експерименти стосувалися лише сонячних (фотоелектричних) та певною часткою малих гідроелектричних станцій. Оскільки ГЕС мають радше регулюючу природу, фактично досліджувалися лише впливи ФЕС, тоді як вітрова енергія має зовсім іншу поведінку. Отже, практичне дослідження власне складової ВДЕ є дещо однобоким, хоча запропоновані теоретичні методи придатні для різних видів ВДЕ.

2. У підрозділі 1.3 досить детально описано показники якості електропостачання та функціональної готовності електричних мереж, однак не зазначено, що є відомими підходами, а що запропоновано автором.

3. Гістограми густин потужності генерування ФЕС описано як полімодальні та представлено суперпозицією розподілів (ф. 2.17), однак насправді (і це зазначено автором, рис. 2.9) така полімодальність обумовлена складанням розподілів, притаманних різним порам року. Автором не обґрунтовано потребу в інтегруванні річних даних замість розгляду окремо різних сезонів.

4. В п.2.2.2 автор застосовує модель гаусової суміші для опису процесів генерування та споживання електроенергії, однак не підтверджує незалежність компонент суміші, зокрема рівень взаємної кореляції генерування та споживання, що здатний вплинути на рівень небалансу потужностей (п. 2.2.3).

5. В п.3.3 заявлено двоїсту задачу оптимізації, однак вона не сформульована чітко – двоїстою до задачі мінімуму вартості (ф. 3.9) мала б бути задача на максимум, тут імовірно показника якості, в разі якщо саме якість була обрана як обмеження для критерію вартості.

6. В п. 4.3 при формулюванні задачі оптимізації неточно записано функцію Лагранжа – за невизначеним множником має бути повне обмеження, а не лише права частина, і не зазначено рівності нулю системи похідних (стор.177, формула не нумерована).

7. В.п.6.3.2 наведено методи багатокритеріального вибору рішень, однак не згадано про ранжування критеріїв за пріоритетністю, що було б доцільним в задачах з експертними оцінками.

8. Наявні помилки в написанні формул та оформленні рисунків, зокрема:

- формула (1.4) – не вказано межі зміни індексу суми (власне індекс зазначено як постійну), це зустрічається і надалі (наприклад, у ф. 3.2);
- формула (1.21) – всі нижні межі інтегрування вказано як нуль, хоча результат інтегрування стосується послідовності суміжних інтервалів;
- рисунки 2.18-2.19 мають по кілька варіантів (а, б, в, г), однак на самих рисунках ці варіанти не підписані;
- в формулі (5.1) складові мають різну розмірність (грн./год та грн.);
- рисунки 5.1, 6.16, 6.18, 6.5 складні для сприйняття, оскільки мають багато елементів, і суть внесених змін важко знайти.



9. Викладення матеріалу загалом чітко та стилістично виважене, однак певна кількість орфографічних та синтаксичних помилок все ж присутня, особливо в останніх розділах.

Зроблені зауваження мають переважно формальний або рекомендаційний характер та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

#### **9. Загальний висновок опонента по дисертаційній роботі**

Дисертаційна робота Комара Вячеслава Олександровича на тему «Оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що вирішують актуальну науково-прикладну проблему розвитку теорії оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. Розглянуто широкий клас задач щодо методів оцінювання якості, розрахунку числових показників, постановки спеціальних задач оптимізації та методів їх розв'язку. Крім того, ряд задач стосується специфіки відновлюваної енергетики – побудови імовірнісних моделей, визначення потреб у резервуванні потужності та акумуляуванні енергії, впливу на якісні показники електроенергії. Отримані результати є істотним вкладом як до загальних теоретичних засад функціонування електроенергетичних систем з розподіленою генерацією, так і до питань інтеграції відновлюваних джерел енергії, а також спрямовані на безпосереднє використання в енергетичній галузі.

За напрямом обраних і вирішених завдань дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

За змістом і одержаними результатами дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року (зі змінами), а її автор, Комар Вячеслав Олександрович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, заступник директора  
Інституту відновлюваної енергетики НАН України



М.П.Кузнецов