

## ВІДГУК

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

### 1. Актуальність теми досліджень.

Сучасні системи передавання і розподілу електричної енергії характеризуються, з одного боку, постійним ускладненням їх структури, а, з іншого – підвищенням вимог до надійності електропостачання та якості послуг, що надаються.

Значною мірою зазначені обставини пов'язані з широким розвитком, так званої, малої генерації, де провідну роль відіграють відновлювані джерела енергії, що характеризуються нестабільністю вихідних параметрів. Зазначена стратегія розвитку галузі, безумовно, відіграє позитивну роль в забезпеченні енергетичної незалежності країни, підвищенні енергоефективності, поліпшенні екології навколишнього середовища. Однак, паралельно з цим істотно зростає складність управління енергосистемами в плані забезпечення надійності електропостачання та необхідної якості електричної енергії. В першу чергу, це стосується систем розподілу електроенергії, структура і принципи функціонування яких за зазначених умов змінюються кардинальним чином.

З огляду на наведені міркування, дослідження виконані в дисертаційній роботі Комара В.О. і пов'язані з розробкою нових методів і засобів комплексної оцінки якості функціонування електричних мереж, в структурі яких є відновлювані джерела енергії, є своєчасними, актуальними і мають важливе теоретичне і практичне значення.

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

Дисертація виконана в плані наукових досліджень кафедри електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізації їх живлення» (№ держреєстрації 0110U002161), «Методи та засоби оптимізації сумісної роботи локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії та систем централізованого електропостачання» (№ держреєстрації 0113U003138), «Методи аналізу та оптимізації режимів електричних мереж з об'єктами розподіленого генерування і неконвенційними навантаженнями» (№ держреєстрації 0113U003198), «Оптимізація режимів електричних мереж з розподіленими джерелами енергії» (№ держреєстрації 0113U002260С), «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (№ держреєстрації 0115U002382). Автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець. За

держбюджетною темою «Інтегрування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в електричні мережі для підвищення їх енергоефективності з використанням SMART GRID технологій» (№ держреєстрації 018U000206) та госпдоговірними темами «Програмно-апаратний комплекс прогнозування режимів функціонування фотовольтаїчних електричних станцій» (№ договору 2162), а також «Розроблення системи прогнозування виробітку електричної енергії фотоелектричними станціями» (№ договору 2163) автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як відповідальний виконавець.

### **3. Ступень обґрунтованості і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.**

В результаті виконаних теоретичних досліджень і на основі наявного практичного досвіду автором вперше запропоновано і обґрунтовано доцільність формування та використання інтегрального показника якості, що відображає економічні та технічні аспекти функціонування електричних мереж, які мають в своїй структурі відновлювані джерела енергії.

Обґрунтованість наукових положень, достовірність отриманих результатів та висновків визначаються теоретичною аргументацією обраних методів досліджень, яка не викликає сумнівів, коректністю їх застосування, експериментальними дослідженнями, широкою апробацією результатів дисертаційних досліджень на багатьох національних та міжнародних конференціях і семінарах.

Сформульовані автором рекомендації безумовно дозволяють визначити практичні кроки щодо шляхів найбільш ефективної форми впровадження в існуючі електричні мережі різноманітних засобів розосередженої генерації, у подальшому на їх підставі розробити алгоритми та методи керування режимами зазначених мереж.

### **4. Наукова новизна одержаних результатів**

Найбільш важливі аспекти наукової новизни дисертаційної роботи полягають у наступному:

- вперше, на підставі запропонованого автором інтегрального показника якості, розроблено теоретичні основи і принципи оцінювання ефективності функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, що дозволяє визначити їх готовність забезпечувати необхідний рівень енергоефективності електропостачання;

- за рахунок поєднання теорії подібності та теорії марковських процесів запропоновано принципово новий методологічний підхід для математичного опису функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, що дозволило отримати інтегральний показник для оцінки якості їх функціонування;

- розроблено методи оцінювання складових інтегрального показника якості функціонування електричних мереж, які ґрунтуються на застосуванні принципу найменшої дії і дозволяють об'єктивно оцінювати відхилення окремих показників від їх оптимального значення, що дає змогу порівнювати електричні мережі з відновлюваними джерелами енергії з урахуванням особливостей режимів генерування і споживання електричної енергії;

– на підставі використання інтегрального показника якості запропоновано та теоретично обґрунтовано новий принципи розпізнавання конкурентоспроможних стратегій розвитку електричних мереж, що створює основу для побудови методів пошуку оптимальних стратегій їх розвитку.

#### **5. Практичне значення отриманих результатів**

Автором на підставі виконаних досліджень вирішено низку актуальних задач, розроблені алгоритми та програмне забезпечення спрямовані на підвищення якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, які зокрема включають:

– методичне забезпечення для аналізу впливу відновлюваних джерел енергії на якість функціонування електричних мереж, що дозволяє розв'язати вказану задачу в умовах обмеженості і невизначеності інформації;

– алгоритми узгодження електроспоживання та генерування в локальній електричній системі, які використані для визначення складових інтегрального показника якості її функціонування з метою прийняття рішень під час розгляду задач стратегічного планування;

– методи і алгоритми визначення оптимальної стратегії розвитку електричних мереж в умовах впровадження джерел розосередженого генерування для обґрунтування технічних умов на їх приєднання;

– методика визначення кількісного інтегрального показника якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, яка реалізована в програмному продукті, призначеному для розв'язання задач аналізу і синтезу локальних електричних систем, зокрема визначення доцільності вкладання інвестицій.

#### **6. Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях**

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, 2 у наукових періодичних виданнях України, 6 публікацій у збірниках матеріалів та тез наукових конференцій. Крім того, отримано 1 патент на корисну модель, 3 свідоцтва про реєстрацію авторського права на програмні продукти, розроблені за результатами досліджень.

#### **7. Аналіз змісту дисертації**

Дисертація складається з анотації, списку наукових праць автора, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 200 найменувань і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 337 сторінок, з яких 304 сторінки складає основний текст, вона містить 149 рисунків та 23 таблиці.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначені предмет та об'єкт досліджень, сформульовані мета і задачі дисертаційної роботи, зазначені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, відображено

зв'язки роботи з науковими програмами та інформацію відносно апробації отриманих результатів.

**У першому розділі** проведено аналіз впливу відновлюваних джерел енергії на характеристики режимів електричних мереж, які визначають якість електропостачання і згідно з діючим законодавством характеризуються рівнем надійності й економічності надання послуг з постачання електричної енергії та її якістю.

Продемонстровано, що існуючий стан розподільних електричних мереж, який характеризуються зношеністю, морально та технічно застарілим обладнанням, низьким рівнем автоматизації з обмеженістю дистанційного керування комутаційними апаратами, слабким інформаційним забезпеченням, невпорядкованим впровадженням розосередженої генерації (насамперед відновлюваних джерел енергії) негативно впливає на якість електропостачання.

Враховуючи наведені фактори, автор обґрунтовує доцільність одночасної з розвитком розосередженої генерації реконструкцію електричних мереж, що дозволить у повній мірі використати потенціал відновлюваних джерел енергії для певного регіону. На підставі зробленого аналізу автор пропонує власну модель вирішення зазначеного завдання, яка побудована на поєднанні принципів теорії марковських процесів та теорії подібності, що дає змогу врахувати імовірнісну природу режимних параметрів електричних мереж при формуванні інтегрального показника їх якості.

**Другий розділ** присвячено розробленню методів оцінювання окремих складових інтегрального показника якості функціонування електричних мереж. При цьому зазначені показники оцінюються відносно так званого «ідеального» режиму. Інтеграція додаткових джерел енергії в традиційні розподільні мережі може привести до появи окремих ліній з двостороннім живленням, При цьому виникає завдання формування режиму їх роботи, який дозволить мінімізувати втрати електричної енергії. У зв'язку з цим, в дисертаційній роботі досліджуються зазначені режими роботи електричних мереж та визначаються умови забезпечення оптимального розподілу активних та реактивних потужностей в мережах з двостороннім живленням.

Логічно, що відповідна складова показника якості у такому випадку повинна характеризувати відповідність окремих режимів електричних мереж «ідеальному» при різних потужностях споживання та генерування.

Запропоновано аналітичний вираз для аналізу балансової надійності шляхом порівняння графіку генерування з боку відновлюваних джерел енергії з графіком навантаження фідеру.

У якості базового показника, який характеризує якість електричної енергії розглядається відхилення напруги. При цьому відповідна складова інтегрального показника якості визначається відхиленням напруги від їх «ідеальних» значень. З цією метою для кожної конкретної мережі будується низка залежностей, які визначають діапазон зміни струмів навантаження відносно струмів з боку відновлюваних джерел енергії при яких відхилення напруги у вузлах навантаження буде відповідати нормативним значенням.

**Третій розділ** дисертації присвячено вирішенню питань комплексного оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії та одночасним врахуванням індивідуальних особливостей споживачів.

При цьому інтегральний показник якості враховує імовірності забезпечення балансової надійності, відповідності фактичних режимів «ідеальному» за втратами активної потужності, забезпечення нормативних відхилень напруги і спотворень її синусоїдальної форми нормативним значенням.

Отримана інтегральна оцінка якості функціонування електричних мереж може бути використана для техніко-економічної оцінки доцільності реалізації заходів по реконструкції певних ліній електропередач.

**У четвертому розділі** продемонстровано яким чином визначений інтегральний показник якості використовується для знаходження оптимальної стратегії розвитку електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. При цьому задача формулюється як вибір оптимального варіанту, при якому забезпечується заданий рівень якості функціонування електричної мережі за умови мінімальних витрат на її реконструкцію та експлуатацію.

В розділі наведено математичне формулювання зазначеної задачі та розроблений автором алгоритм її вирішення.

**У п'ятому розділі** виконано комп'ютерне моделювання впливу низки відновлюваних джерел енергії на показник якості функціонування електричних мереж, використовуючи інформацію отриману на реальному об'єкті ПАТ «Винницяобленерго». Метою зазначених досліджень була розробка пропозицій щодо визначення параметрів та вибору режимів роботи зазначених генеруючих джерел.

При цьому, враховуючи недоцільність обмеження вихідної потужності відновлюваних джерел, розглядається можливість зміни графіку споживання електричної енергії. Для вирішення цього завдання пропонується математична модель оцінювання вартості зміщення у часі рівнів споживання енергії шляхом використання багатозонних тарифів на електричну енергію.

З метою узгодження рівнів генерування та споживання електричної енергії при суттєвих відхиленнях метеорологічних умов від їх середньостатистичних даних, розглядається можливість додаткового використання накопичувачів енергії.

В заключній частині розділу розглянуті питання визначення потужності резерву, який має забезпечити енергосистема з метою гарантування виконання постійного балансу між генеруванням та споживанням енергії. На підставі експериментальних досліджень продемонстровано яким чином кожний із розглянутих заходів впливає на покращення показника якості функціонування електричних мереж.

**У шостому розділі** здійснено апробацію розроблених автором методів та алгоритмів шляхом використання як натурних експериментів, так і комп'ютерного моделювання. Одночасно з цим сформульовані вимоги щодо

інформаційного забезпечення розглянутого кола задач та системи моніторингу, необхідних для подолання складнощів ефективного вирішення зазначених питань на підставі існуючої інформаційної бази, яка формується здебільш за рахунок даних АСКОЕ, що є недостатнім.

Виходячи з цього, автором запропоновано перспективну дворівневу структуру систему моніторингу та керування в рамках концепції Smart Grid. Саме за таких умов можуть бути вирішені такі принципові завдання як забезпечення активної поведінки споживачів, оптимального інтегрування різноманітних засобів розосередженої генерації та акумулювання електричної енергії в електричній мережі, забезпечення максимально ефективних режимів роботи систем розподілу електричної енергії шляхом здійснення моніторингу режимів їх роботи в реальному часі.

У заключній частині розділу автор наводить результати комплексного тестування розроблених методів. При цьому досліджується яким чином запропоновані в роботі заходи, як взяті окремо, так і їх комплексному використанні, впливають на показник якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. Демонструється доцільність використання саме системного підходу для вирішення сформульованих в дисертаційній роботі мети та завдань досліджень.

## **8. Зауваження до змісту дисертаційної роботи**

1. Уявлення, що електрична мережа може знаходитися лише в двох станах працюючи або як розімкнена, або як «класична» замкнена (рис. 2.7, 2.8), де струморозподіл залежить лише від її параметрів здається занадто спрощеним. В дійсності існує багато проміжних режимів, які визначаються співвідношеннями навантажень окремих вузлів і вихідною потужністю джерела розосередженої генерації і де параметри самої мережі не відіграють принципової ролі.

2. В підрозділі 2.2.4 зроблено висновок, що мінімум втрат потужності, а, відповідно і енергії, має місце, коли генерування з боку відновлюваних джерел енергії у кожен момент часу пропорційно навантаженню. Але у загальному випадку в різні періоди часу генерування може пропорційно як перевищувати навантаження, так і навпаки – бути менше навантаження. У той же час при цьому наслідки з точки зору втрат потужності будуть різні.

3. Визначення, що в «ідеальному» режимі спади напруги і, як наслідок, відхилення напруги у вузлах мережі мінімальні (підрозділ 2.2.5.2, рис. 2.20) не зовсім зрозуміло. Логічно припустити, що будь-який режим, при якому відхилення напруги у електроприймачів знаходиться в припустимих межах, по суті і є «ідеальним».

4. Автором передбачається можливість використання фільтрів вищих гармонік для забезпечення відповідної якості електричної енергії. При цьому світовий досвід свідчить, що сертифіковані силові перетворювачі зазвичай не розглядаються як джерело вищих гармонік. У той же час автор не передбачає можливості використання додаткових (місцевих) засобів регулювання напруги, що виглядало би більш логічним. Це впливає з того, що поява джерел генерації в окремих розподільних лініях підвищує неоднорідність їх

навантажень, що, в свою чергу, зменшує ефективність централізованого регулювання напруги.

5. У розділі 3 (стор. 180) зазначається, що перший етап традиційного методу визначення оптимальної стратегії реконструкції електричних мереж полягає у визначенні найбільш імовірних схем, які мають найбільший вплив на значення інтегрального показника якості. Але при цьому відсутні будь-які міркування, яким чином цей процес може бути формалізований, навіть спираючись на приклад наведений у підрозділі 4.4.1.

6. В розділі 3 розглядається питання визначення складових інтегрального показника ефективності для умовної схеми розподільних мереж. При цьому не зазначені допущення, за яких виконується оцінювання. Наприклад, при оцінюванні якості електричної енергії (рівнів напруги) не зрозуміло за який час розглядається зміна навантаження, яким чином враховується вся кількість споживачів, для яких визначаються припустимі відхилення напруги, чи враховуються при розрахунках характеристики мереж 0,38 кВ та параметри технічних засобів регулювання напруги і таке інше.

7. Висновок 1 розділу 4 є досить суперечливим. Не зрозуміло в яких випадках при обґрунтуванні технічних умов на приєднання джерел розосередженої генерації існує можливість визначати їх потужність, тим паче, якщо це стосується відновлюваних джерел енергії.

8. Яким чином можна пояснити характер відхилення напруги протягом доби (рис. 4.9), який, з одного боку, сягає 12 %, а з іншого – максимальне відхилення напруги має місце в період мінімальних навантажень.

9. Відсутні пояснення, на підставі яких міркувань визначається стан локальної електричної системи (підрозділ 5.1.2), що є принциповим для її подальшого аналізу.

10. Відсутні визначення або певні посилення відносно того, що собою являє коефіцієнт якості напруги (рис. 5.9).

11. В дисертаційній роботі використовується низка математичних виразів (наприклад, 2.21, 2.25, 3.11), де відсутні пояснення відносно окремих змінних, індексів і т.і., що ускладнює їх тлумачення.

Проте зазначені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву результати досліджень та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

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

Дисертаційна робота Комара Вячеслава Олександровича «Оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії» є цілісним завершеним науковим дослідженням, присвяченим вирішенню важливої і актуальної прикладної задачі підвищення ефективності побудови та подальшого функціонування сучасних розподільних мереж з джерелами розосередженої генерації. Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи та за своєю актуальністю, науковою новизною, теоретичними та практичними результатами вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України

№567 від 24.07.2013 р. (зі змінами затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 р. №656), а здобувач Комар Вячеслав Олександрович заслуговує присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

**Офіційний опонент:**

професор кафедри електропостачання  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»  
д.т.н., доц.



Попов В.А.

Підпис д.т.н., доц. Попова В.А. підтверджую.

Вчений секретар  
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»



Мельниченко А.А.