

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Лисенко Ольги Валеріївни на тему «Наукові основи підвищення енергетичної ефективності та якості електропостачання в електротехнічних системах з комбінованою генерацією», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю

05.09.03 – електротехнічні комплекси та 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. 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 забезпеченням 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 витісняти 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 відбутися відключення від мережі та втрата «зеленої» енергії навіть при сприятливих погодних умовах.

Існуюча методологія розвитку систем електропостачання не враховує в повній мірі особливості відновлюваних джерел енергії, складова яких в загальному балансі з кожним роком зростає, що призводить до прийняття проектних

рішень з низькими показниками ефективності. Тому дослідження особливостей функціонування відновлюваних джерел енергії і розроблення методів і засобів, що дозволяють врахувати ці особливості під час розв'язання проектних задач є актуальним.

В дисертаційній роботі Лисенко О. В. проведено роботу з розроблення методів і засобів підвищення якості електропостачання споживачів та ефективності проектних рішень в електротехнічних системах з комбінованою генерацією на базі відновлюваних джерел енергії шляхом оптимізації їх структури на основі системного аналізу.

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

Дисертація виконана в плані наукових досліджень Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного та відповідно до договору про спільну діяльність між ТДАТУ та Інститутом відновлюваної енергетики НАН України. За держбюджетною темою «Автоматизація електротехнічних систем в АПК» та ще двома науково-дослідними роботами з шифром «Комплекс-3» та «Комплекс-М». Зазначені теми стосуються в тому числі дослідження електротехнічних системах з комбінованою генерацією, 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 підвищення якості електропостачання споживачів та ефективності проектних рішень в електротехнічних системах з комбінованою генерацією шляхом оптимізації їх структури на основі системного аналізу.

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

- встановлено взаємну незалежність випадкових процесів змін поточних потужностей генерування умовно керованими джерелами енергії та електроспоживання, що дозволило побудувати адекватну математичну модель процесу балансування потужностей.

- формалізовано особливості стохастичної оптимізації енергосистем з комбінованим застосуванням різних типів відновлюваних та традиційних джерел енергії, що дозволило розв'язати оптимізаційну задачу з обмеженнями.

- формалізовано задачу забезпечення енергобалансу комбінованих електротехнічних систем шляхом застосуванням методу декомпозиції з урахуванням дискретної та неперервної складових у різних часових градаціях до випадкових процесів, що дозволило врахувати можливості прогнозування потужності генерування і споживання.

Ряд використаних автором методів набули подальшого розвитку, зокрема метод розрахунку показників балансової надійності електротехнічних систем із комбінованою генерацією, метод багатокритеріальної оптимізації стосовно комбінованих енергосистем різного рівня.

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

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації досить обґрунтовані. Теоретичні дослідження базуються на використанні методів теорії ймовірності, статистичних методів обробки даних, регресійного аналізу, методів ана-

літичного та числового розв'язання диференційних та алгебраїчних рівнянь. Для опису поточної потужності вітрових і сонячних електростанцій та процесів споживання електричної енергії використано математичне моделювання випадкових процесів. Для дослідження режимів роботи енергосистеми сумісно з ВДЕ використано імітаційне комп'ютерне моделювання та методи Монте-Карло.

Висновки є обґрунтованими, логічно завершеними та випливають зі змісту дисертації. Зокрема, у висновках відображені результати вирішення поставлених задач.

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

На підставі виконаних досліджень автором вирішено актуальну задачу забезпечення енергетичної ефективності та якості електропостачання в електротехнічних системах із комбінованою генерацією при використанні відновлюваної енергетики. Результати досліджень створюють достатню наукову базу для визначення впливу ВДЕ на якість забезпечення електричною енергією електротехнічних систем різного рівня локальності, а саме: як окремих споживачів та населених пунктів, так енергетичної системи в цілому, що дає змогу точніше оцінити фактичні небаланси генерування та споживання електричної енергії в реальному масштабі часу. Зокрема, розроблено засоби визначення реальної потреби в резервних та маневрових потужностях для досягнення енергетичної та економічної ефективності в електротехнічних системах із комбінованою генерацією; методологію виконання стохастичної оптимізації складу генеруючих потужностей для електротехнічних систем із комбінованою генерацією та запропонований метод розрахунку конфігурації енергосистеми.

Результати роботи передані для дослідної експлуатації в електропостачальні компанії, Запорізьку обласну державну адміністрацію та Мелітопольську районну раду. Впровадження результатів дисертаційної роботи реалізовано в Інституті відновлюваної енергетики НАН України, Мелітопольських високо-вольтних електромережах ПАТ «Запоріжжяобленерго», що підтверджено довідками про впровадження. Матеріали дисертації використано також в навчальному процесі Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного та Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

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

Матеріали дисертаційної роботи опубліковані у 32 друкованих наукових працях, з них 1 монографія, 18 статей у наукових фахових виданнях України та 5 статей у періодичних виданнях іноземних держав, що входять до міжнародних наукометрических баз Web of Science та Index Copernicus, 8 публікацій у збірниках матеріалів та тез наукових конференцій. Щодо публікацій виданих у співавторстві вказано доробок автора дисертації. Зміст публікацій відповідає матеріалам, викладеним у дисертації.

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

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

Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел (226 найменувань) і двох додатків. Основний зміст викладений на 311 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.

У **першому розділі** виконано огляд стану сучасних систем електропостачання та перспективи якісного та надійного забезпечення споживачів електричною енергією в умовах розбудови відновлюваних джерел енергії. Проведений огляд існуючих показників балансової надійності і проаналізовано можливість їх застосування для оцінювання систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії. Визначено перелік задач для дослідження роботи електротехнічних систем з комбінованим генеруванням.

У **другому розділі** на основі аналізу метеоданих, що характеризують роботу сонячних та вітрових електростанцій в досліджуваному регіоні визначені додаткові характеристики, які дозволяють підвищити адекватність врахування флюктуації генерованої потужності відновлюваними джерелами енергії.

Запропоновано модель сумісної роботи вітрових і сонячних станцій. Проведено перевірку її адекватності.

У **третьому розділі** досліджено дані, що характеризують споживання електричної енергії в досліджуваному регіоні. На їх основі побудовано математичну модель навантаження. При цьому процес споживання моделюється як стохастичний процес. Показано що моделювання випадкового процесу лінійною декомпозицією для опису поточних флюктуацій краще орієнтуватися на різницю суміжних значень ряду, тобто диференційований часовий ряд.

У **четвертому розділі** запропоновано математичний опис оптимізаційних задач в системах з вітро-сонячним генеруванням, визначені критерії оптимальності та системи обмежень. Зроблено загальний огляд методів оптимізації. Запропонована класифікація задач оптимізації в умовах невизначеності, притаманних енергосистемам з ВДЕ, вказано відмінності за цільовими функціями, по характеру обмежень і по виду рішення. Формалізовано особливості стохастичної оптимізації енергосистем з комбінованим застосуванням різних типів джерел енергії.

У **п'ятому розділі** розроблено методологію розрахунку показників балансової надійності та їх довірчих інтервалів для локальних електротехнічних систем. З метою підвищення ефективності використання вітрових і сонячних станцій показано доцільність проведення перспективного моделювання можливих ситуацій використовуючи розподіли випадкових величин метеофакторів і рівня споживання. Запропоновано для визначення оптимальної конфігурації електротехнічної системи із комбінованим генеруванням застосовувати багатокритеріальну оптимізацію, що враховує стохастичний характер складу генерувальних потужностей.

**Шостий розділ** присвячено резервуванню та акумулюванню енергії в комплексних системах з ВДЕ. Використовуючи розроблений метод обґрунтовується необхідність і ємність акумулюючих установок виходячи з наявного прогнозування, або статистичних даних за попередній період. Виконано аналіз ризиків пов'язаних з недотриманням необхідного рівня надійності.

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

Список використаних джерел містить 226 посилань, в тому числі 49 англомовних.

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. В п. 1.4 автор доповнює поняття якості електропостачання складовою невизначеності (показник розкиду), яка зумовлена появою відновлюваних джерел енергії. На мою думку, це зайве оскільки визначення якості електропостачання приведене в Законі України про ринок електричної енергії включає, опосередковано, цю невизначеність в складовій надійності, яка і аналізується в дисертаційній роботі.

2. В роботі під час оцінювання впливу відновлюваних джерел енергії на якість електричної енергії основну увагу приділено несиметрії і несинусоїдності струмів та напруг, при цьому практично не згадано про вплив небалансу, зумовленого ВДЕ, на відхилення частоти в системі.

3. У підрозділі 2.4 досить детально описано вирази для визначення миттєвої потужності, однак не зазначено, що є відомим, а що запропоновано автором.

4. В роботі зустрічаються вирази без достатнього пояснення до них, що ускладнює їх розуміння. Так на стор. 82 наведено вираз, який визначає залежність між імовірністю втрати навантаження та імовірністю втрати генерування як подіями, які складають повну групу, що не відповідає системам з традиційним та відновлюваним джерелами енергії.

5. З роботи не зрозуміло яким чином під час вибору ємності накопичувача враховується нелінійність характеристик заряду і розряду.

6. В розділі 4 розглядається багатокритеріальна задача оптимізації, однак не згадано про ранжування критеріїв за пріоритетністю, особливо це стосується критеріїв, які можуть змінювати свою вагу в залежності від зацікавленої сторони, по відношенню до якої розв'язується задача (споживач, власник ВДЕ, електричні мережі).

7. Дисертація обтяження загально відомою інформацією, особливо це стосується першого розділу:

стор. 84 – опис математичної моделі оптимізаційної задачі;

стор. 86 – опис детермінованого та стохастичного програмування;

стор. 119 – визначення трекеру, та його особливості.

8. Наявні помилки в оформленні рисунків, зокрема: рисунки 3.6, 3.7, 3.8, 3.16 складні для сприйняття, оскільки мають багато елементів і відсутня легенда.

9. Викладення матеріалу загалом чітке та стилістично виважене, однак певна кількість орфографічних та синтаксичних помилок все ж присутня.

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 Лисенко Ольги Валеріївни на тему «Наукові основи підвищення енергетичної ефективності та якості електропостачання в електротехнічних системах з комбінованою генерацією» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що вирішують актуальну науково-прикладну проблему підвищення якості електропостачання споживачів та ефективності проектних рішень в електротехнічних системах з комбінованою генерацією на базі відновлюваних джерел 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 акумулюванні енергії, впливу на якісні показники електроенергетики. Отримані результати є істотним вкладом як до загальних теоретичних зasad 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 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

За змістом і одержаними результатами дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затверджено-го постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року (зі змінами), а її автор, Лисенко Ольга Валеріївна, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, доцент,  
доцент кафедри електричних станцій та систем  
Вінницького національного технічного університету  
Міністерства освіти і науки України



В. О. Комар

Підпис В. О.  
ПОСВІДЧУЮ  
Зав. канцелярією Л.