

Міністерство освіти і науки України  
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

**Лисенко Ольга Валеріївна**

УДК 621.311.1:620.92

**НАУКОВІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ  
ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ З КОМБІНОВАНОЮ  
ГЕНЕРАЦІЄЮ**

05.09.03 - електротехнічні комплекси та системи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Мелітополь – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Назаренко Ігор Петрович,**  
декан факультету енергетики і комп'ютерних технологій Таврійського державного агротехнологічного університеті імені Дмитра Моторного

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Васько Петро Федосійович,**  
завідувач відділу гідроенергетики Інституту відновлюваної енергетики Національної академії наук України

доктор технічних наук, доцент  
**Комар Вячеслав Олександрович,**  
доцент кафедри електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету

доктор технічних наук, доцент  
**Будько Василь Іванович,**  
доцент кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Захист відбудеться «05» листопада 2020 р. о 10 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д18.819.01 у Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного (72312, Запорізька область, м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18, ауд. 1.111).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Таврійського державного агротехнологічного університеті імені Дмитра Моторного (Запорізька область, м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18).

Автореферат та дисертація розміщені в мережі Internet за адресою [www.tsau.edu.ua/nauka/category/dissertation](http://www.tsau.edu.ua/nauka/category/dissertation)

Автореферат розісланий «02» жовтня 2020 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради

О.Ю. Вовк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Нині намітився і реалізується на практиці поступовий перехід від суто централізованої моделі електропостачання споживачів, основою якої є потужні теплові та атомні електричні станції, до комбінованої, коли частина електроенергії виробляється розосередженими джерелами енергії (РДЕ). Розподільні електричні мережі при цьому набувають риси локальної електротехнічної системи (ЛЕС). Оскільки електричні мережі енергосистем проектувалися і споруджувалися за умов централізованого електропостачання, то розбудова в них РДЕ породжує нові, нехарактерні для минулого періоду, проблеми і задачі.

Вітрова та сонячна енергетика може інтегруватися в енергосистему за допомогою відповідних стратегій. На першій стадії, коли частка ВДЕ не перевищує 3% у річному виробництві електроенергії, їх інтеграція не справляє помітного впливу на мережу. Коли частка ВДЕ у річній генерації знаходиться в межах до 15%, це спричиняє серйозний вплив на режими енергосистеми. На третій стадії (понад 15%) виникають суттєві виклики для режимного управління енергосистеми. Наразі за рівнем впровадження ВДЕ Україна підходить до межі першої та другої стадій. Таким чином існує **народно-господарська проблема**, пов'язана із ускладненням забезпечення надійного балансу генерації та споживання електричної енергії що обумовлено зростанням частки потужностей мінливих ВДЕ і відповідно витіснення традиційної генерації. У свою чергу, незбалансованість потужностей негативно впливає на якість електропостачання, а саме, призводить до відхилень частоти та напруги в споживчій мережі, погіршує відомі індекси балансової надійності електропостачання та веде до можливих технічних збоїв і економічних втрат. Зі збільшенням частки нестабільної генерації стає необхідним більш ґрунтовний системний підхід до формування енергетичної системи. Під енергетичною ефективністю у відновлюваній енергетиці мається на увазі максимально повне використання встановленої потужності, тому на часі розробка вдосконалених математичних моделей щодо процесів генерації електричної енергії ВДЕ та процесів споживання електричної енергії, які дозволили б адекватно оцінити характер невизначеності в їх роботі, обґрунтувати оптимальні рівні впровадження ВДЕ з урахуванням графіків споживання та сформувані алгоритми узгодженої роботи у складі локальної чи об'єднаної енергосистеми.

Дослідження випадкового характеру потужності ВДЕ, і відповідно роботи вітроелектричних та фотоелектричних станцій, виконуються з початку активного розвитку відновлюваної енергетики. Вимоги до роботи електроенергетичної системи України, прогнозування її розвитку та впровадження відновлюваної енергетики розглядалися О.В.Кириленком, С.О.Кудрею, П.Д.Лежнюком, В.А.Поповим, П.Ф.Васьком, В.М.Головком, В.В.Павловським, С.В.Дубовським, В.О. Комаром, В.І. Будько та іншими. Аналіз енергетичної складової вітрового режиму території України представлений в працях С.О. Кудрі, Н.М.Мхітаряна, М.П. Кузнєцова, Л.В.Дмитренка, С.Л. Барандіча. У працях оцінено енергетичний потенціал,

проведено районування території України за показниками енергоресурсів. Однак детального аналізу регіональних особливостей енергетичного потенціалу ВДЕ не проводилось, в першу чергу за відсутністю необхідних даних для проведення таких досліджень. Адже ті дані, якими оперує метеорологічна служба, не відповідають потребам енергетики, тому що існуючі підходи базуються в основному на осереднених даних та детермінованих функціях. Для досягнення кращої адекватності моделей та точності оцінок досліджуваних процесів доцільно їх розглядати випадкові, із застосуванням методів теорії імовірності та математичної статистики, що дозволить забезпечити задовільну точність при складанні прогнозів потужності. Розосереджений характер розташування потужностей ВДЕ і їх наближення до кінцевого споживача дають змогу розглядати частину енергосистеми регіонального чи муніципального рівня як локальну, що в свою чергу створює можливості для більш ефективного використання ВДЕ з одночасним покращенням якості постачання енергії.

Актуальною науково-прикладною проблемою є розвиток теоретичних основ та практичних методів забезпечення енергоефективності електротехнічних систем з комбінованою генерацією, що враховують випадковий характер режимів генерування та споживання енергії і потребують комплексного розгляду питань, пов'язаних з дією випадкових чинників. Зокрема потребують подальшого вивчення процеси використання ВДЕ з урахуванням впливу імовірнісної природи генерації електричної енергії на збалансованість роботи енергосистеми, для визначення можливостей до підвищення якості електропостачання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконувалась за планом наукових досліджень Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного. Тема дисертаційної роботи пов'язана з планами НДР за держбюджетною темою: «Автоматизація електротехнічних систем в АПК» (ДР № 0116U002728). Відповідно до договору про спільну діяльність між ТДАТУ та Інститутом відновлюваної енергетики НАН України матеріали дисертації використано у наукових дослідженнях при виконанні науково-дослідних робіт з шифром «Комплекс-3» (ДР № 0118U003385) та «Комплекс-М» (ДР № 0117U000703).

**Мета та завдання дослідження.** Метою досліджень є розробка науково-технічних основ підвищення якості електропостачання споживачів та ефективності проектних рішень в електротехнічних систем з комбінованою генерацією на базі відновлюваних джерел енергії шляхом оптимізації їх структури на основі системного аналізу.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- визначити фактори впливу на роботу електротехнічних систем з комбінованою генерацією з боку ВДЕ та встановити їх роль у забезпеченні якості електропостачання;

- провести статистичну обробку, аналіз її результатів та розрахунок визначених параметрів метеоданих (швидкість і напрям вітру, рівень сонячної радіації, темпи їх змін та сезонні особливості), що характеризують роботу електротехнічних систем з комбінованою генерацією на базі ВДЕ в

досліджуваному регіоні;

- дослідити закони розподілу, визначити їх параметри та побудувати відповідні функції, що описують поведінку метеофакторів та відповідної потужності ВЕС і СЕС як випадкових величин;

- провести статистичну обробку, аналіз її результатів та розрахунок визначених параметрів, що характеризують споживання електроенергії в електротехнічних системах різного рівня локальності, а саме: окремими населеними пунктами, групами населених пунктів, регіональною енергосистемою;

- дослідити закони сумісного розподілу імовірності випадкових складових навантаження та генерації електротехнічних систем з комбінованою генерацією від ВДЕ;

- дослідити критерії, що визначають збалансованість електротехнічних систем з комбінованою генерацією, та встановити фактори, які спричинені наявністю ВДЕ і врахуванням випадкової природи генерації;

- розробити критерії та системи обмежень, що визначають оптимальність застосування комбінованої генерації при різних обсягах впровадження ВДЕ;

- розробити алгоритми розрахунку показників якості електропостачання та їх довірчих інтервалів для електротехнічних систем із комбінованою генерацією;

- розробити методи та алгоритми розрахунків щодо використання систем резервування та акумулювання енергії в електротехнічних системах із комбінованою генерацією на базі ВДЕ для забезпечення визначеної якості енергопостачання.

*Об'єктом досліджень* дисертаційної роботи є процеси генерації та споживання електричної енергії в електротехнічних системах із комбінованою генерацією з використанням відновлюваних джерел електроенергії.

*Предметом досліджень* є характеристики випадкових процесів, притаманних електротехнічним системам із комбінованою генерацією з використанням відновлюваних джерел.

**Методи досліджень.** Статистичні методи обробки даних щодо показників швидкості вітру, сонячної радіації та потужності споживачів; статистичний та регресійний аналіз для пошуку репрезентативних даних і подальшого прогнозування часових рядів; математичне моделювання випадкових процесів для опису поточної потужності вітрових і сонячних електростанцій та процесів споживання електричної енергії; методи теорії ймовірності для знаходження параметрів випадкових процесів; методи аналітичного та числового розв'язання диференціальних та алгебраїчних рівнянь; імітаційне комп'ютерне моделювання та методи Монте-Карло для дослідження режимів роботи енергосистеми сумісно з ВДЕ.

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

Вперше на підставі дослідження кореляції змін поточних потужностей генерації сонячної і вітрової енергії та споживання електроенергії електротехнічними системами різного рівня локальності встановлено взаємну незалежність швидкоплинних змін цих потужностей як випадкових процесів,

що дозволило побудувати адекватну математичну модель процесу балансування потужностей.

Вперше формалізовано та сформульовано особливості стохастичної оптимізації енергосистем, які відрізняються комбінованим застосуванням різних типів відновлюваних та традиційних джерел енергії, що дозволило дослідити оптимальні розв'язки при уживаних обмеженнях задач оптимізації.

Вперше сформульовано проблему та формалізовано відповідну задачу забезпечення енергобалансу комбінованих електротехнічних систем, яка відрізняється урахуванням можливостей прогнозування потужності та застосуванням методу декомпозиції з урахуванням дискретної та неперервної складових у різних часових градаціях до випадкових процесів, що дозволило описати баланс генерування і споживання електроенергії в електротехнічних системах з комбінованою генерацією.

Набув подальшого розвитку метод розрахунку показників балансової надійності електротехнічних систем із комбінованою генерацією, який відрізняється використанням інтегральних характеристик процесів балансування потужності, що дозволило визначити зазначені показники балансової надійності із заданою довірчою ймовірністю.

Набув подальшого розвитку метод багатокритеріальної оптимізації стосовно комбінованих енергосистем різного рівня, що відрізняється застосуванням стохастичної оптимізації складу потужностей на базі відновлюваних джерел енергії та розрахунку конфігурації електротехнічних систем із комбінованою генерацією, що забезпечило мінімізацію небалансів потужностей та енергетичну ефективність при заданих обмеженнях показників надійності.

Вперше розроблено метод розрахунку потреб у резервних та акумулюючих потужностях для електротехнічних систем з комбінованою генерацією різного рівня локальності з урахуванням випадкових флуктуацій поточного балансу генерації та споживання електроенергії, що дозволило визначити гарантовані із заданою довірчою ймовірністю потреби в акумулюванні енергії.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність роботи полягає в тому, що на підставі виконаних досліджень вирішено актуальну проблему 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 генерації та споживання електричної енергії в реальному масштабі часу.

Досліджена кореляція змін поточної потужності вітро-сонячної генерації та споживання електроенергії в електротехнічних системах різного рівня локальності, а також виявлені властивості швидкоплинних змін як незалежних випадкових процесів дозволяють забезпечити адекватність математичної

моделі енергобалансу, за допомогою якої коректно визначити реальну потребу в резервних та маневрових потужностях для досягнення енергетичної та економічної ефективності в електротехнічних системах із комбінованою генерацією.

Розроблений метод декомпозиції випадкових процесів генерування та споживання електроенергії з урахуванням дискретної та неперервної складових дозволив представити процеси балансування потужностей в аналітичному вигляді з використанням стандартних функцій розподілу, що дозволяє спростити практичні розрахунки.

Методологія виконання стохастичної оптимізації складу генеруючих потужностей для електротехнічних систем із комбінованою генерацією на базі відновлюваних джерел енергії та запропонований метод розрахунку конфігурації енергосистеми дозволяють забезпечити мінімізацію небалансів потужності при дотриманні наперед заданих вимог до надійності енергопостачання.

Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджено обчислювальними експериментами для реальних електричних мереж та порівнянням їх із фактичними даними.

Отримані наукові результати були використані при розробці рекомендацій щодо:

- техніко-економічних обґрунтувань розвитку відновлюваної енергетики, які прийнято до впровадження у Мелітопольському районі Запорізької області Мелітопольською районною радою;

- обґрунтування потреби в резервних та маневрових потужностях для досягнення енергетичної та економічної ефективності в електротехнічних системах із комбінованою генерацією при плануванні розвитку електричних мереж, які прийнято до впровадження у Мелітопольських високовольтних електромережах ПАТ «Запоріжжяобленерго»;

- розрахунку техніко-економічних обґрунтувань розвитку електротехнічних систем із комбінованою генерацією на базі відновлюваних джерел енергії, які прийнято до впровадження у Запорізькій області Запорізькою обласною державною адміністрацією;

- визначення впливу ВДЕ на якість забезпечення електричною енергією комплексних енергосистем, які прийнято до впровадження у Інституті відновлювальної енергетики НАН України;

- вирішення задач забезпечення енергетичної та економічної ефективності систем з відновлюваними джерелами енергії шляхом стохастичної оптимізації їх структури та режимів роботи, які прийнято до впровадження у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного та Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, що містяться в дисертації, отримані автором самостійно. У публікаціях, що видані у співавторстві, автору належить: в роботах [1] – узагальнено сучасні дослідження в частині ефективності проектних рішень в електротехнічних систем з комбінованою генерацією на базі відновлюваних джерел енергії, висновки та рекомендації; [2] – узагальнено сучасні дослідження в частині нових підходів до роботи енергосистеми, адаптованих до наявності мінливих поновлюваних джерел, висновки та рекомендації; [3] – виконано оцінку поточної мінливості потужності вітрового потоку та її вплив на характер постачання електроенергії при роботі у складі централізованої чи локальної електротехнічної системи; [4] – виконано формування задачі дослідження, збір, агрегування та статистична обробка початкових даних вітрового режиму із застосуванням графічних засобів відображення, висновки та рекомендації; [5] - виконано агрегування та статистична обробка початкових даних щодо спільної роботи вітрової та сонячної електростанцій із застосуванням графічних засобів відображення, висновки та рекомендації; [6] - виконано статистичний аналіз вітрової та сонячної енергії, проведено перевірку адекватності моделі сумісної роботи сонячної та вітрової електростанцій, висновки та рекомендації; [7] - проаналізовано сучасні підходи в частині вирішення задач оптимізації та запропоновані відповідні рекомендації що до їх застосування; [8] - досліджена надійність енергозабезпечення при різних сценаріях впровадження ВДЕ, визначена потреба в резервуванні потужностей та виконані розрахунки рівнів небалансу потужності комбінованих енергосистем; [10] - визначені перспективні шляхи використання відновлюваних джерел енергії та обрано напрям подальшого дослідження; [14] - виконані розрахунки оптимального співвідношення різних джерел відновлюваної енергії в гібридних енергосистемах та встановлена наявність оптимальних співвідношень потужності ВЕС та СЕС, при яких мінімізується загальна варіативність енергобалансу; [15] - виконані розрахунки показників комбінованої локальної енергосистеми з накопиченням енергії та їх перевірка шляхом аналізу статистичних даних; [17] - виконані розрахунки для вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації локальної енергосистеми з відновлюваними джерелами енергії та визначено оптимальне рішення поточного стану енергосистеми з різнотипними ВДЕ та системою акумулювання; [18] - запропоновано вирішення задачі комплексного забезпечення електричною енергією з використанням мінливих за природою відновлюваних джерел енергії; [19] - проведений аналіз проблем інтеграції ВДЕ до енергосистеми; [20] - проведений розрахунок та статистичний аналіз даних сонячної радіації у досліджуваному регіоні; [22] - визначені критерії та виконаний розрахунок оптимального співвідношення різних ВДЕ для комбінованих електротехнічних систем; [23] - проведена оцінка впливу нестационарності параметрів математичної моделі на точність прогнозування енергетичного балансу в локальній електротехнічній системі; [32] - проаналізовано можливість сумісної роботи ВДЕ та енергосистем різного рівня локальності.



Результати досліджень, що викладені у [1 – 32], були отримані у Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях та семінарах: Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування, (м. Київ, 2017 р.); VII Міжнародна науково-практичної конференції пам'яті І. І. Мартиненка та з нагоди 85-річчя Таврійського державного агротехнологічного університету «Енергозабезпечення технологічних процесів», (м. Мелітополь, 2017 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», (м. Харків, 2017 р.); II International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science" (м. Варшава, 2017р.); International Scientific and Practical Conference World science, (м. Дубай, 2017р.); Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті. XVIII міжнародна науково-практична конференція, (м. Київ 2017 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК Півдня України», (м. Мелітополь, 2017 р); IV International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Science, (м. Дубай, 2018р.); VI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування» (теорія, практика, історія, освіта), (м. Київ, 2018 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки – 2018», (м. Київ, 2018 р.); Конференція Сторіччю Національної Академії Наук України та Одеського національного політехнічного університету. Міжнародний форум «Енергетика та інформаційні технології», Міжнародна науково-практична конференція «Електротехнічні та комп'ютерні системи: теорія та практика», (м. Одеса, 2018 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя», (м. Київ, 2018р.); VIII Міжнародна науково-практична конференція пам'яті І.І.Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів», (м. Мелітополь, 2019 р.); XX ювілейна міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», (м. Київ, 2019 р.).

**Публікації.** 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 наукометричних баз Web of Science та Index Copernicus, 8 публікацій у збірниках матеріалів та тез наукових конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел (226 найменувань) і двох додатків. Основний зміст викладений на 311 сторінках друкованого тексту, містить 101 рисунки, 95 таблиць. Загальний обсяг дисертації – 365 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Характеристика електротехнічних систем з комбінованою генерацією» виконано огляд стану та перспективи забезпечення споживачів електричною енергією в електротехнічних системах із комбінованою генерацією. Проаналізовано світовий досвід використання відновлюваних джерел енергії. Проведений огляд факторів впливу ВДЕ на роботу енергосистеми.

Створення комбінованих електротехнічних систем енергозабезпечення споживачів із використанням відновлюваних джерел енергії вимагає включення до їх складу систем акумулювання або резервного енергоживлення.

Зі збільшенням частки нестабільної генерації стає необхідним більш ґрунтовний системний підхід до формування енергетичної системи. Обсяги збудованих в Україні об'єктів ВДЕ наведено в табл.1.

Таблиця 1

Встановлена потужність ВДЕ, яким надано «зелений» тариф, МВт/%

Вид ВДЕ	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
ВЕС	194/30	339/29	426/44	426/43	438/39	465/34	533/25	1170/17
СЕС	372/58	748/63	412/43	432/43	531/48	742/54	1388/65	5478/79
МГЕС	73/11	75/6	80/8	87/9	90/8	95/7	99/5	114/2
БіоЕС	6/1	24/2	49/5	52/5	59/5	73/5	97/5	170/2
Усього	645	1186	967	997	1118	1375	2117	6932

Доцільність та ефективність застосування розосередженої генерації (РГ) та формування за її участю комбінованих електротехнічних систем переконливо підтверджені практикою індустріально розвинутих країн. В Україні такими об'єктами на основі ВДЕ є переважно сонячні електростанції (СЕС) потужністю від десятків кіловат до десятків мегават. Вітрові електростанції (ВЕС) здебільшого мають потужності в десятки мегават, проте завдяки модульному принципу окремі вітроенергетичні установки (ВЕУ) можуть виступати як самостійні станції.

Слід зазначити, що незважаючи на порівняно невелику частку генерованої об'єктами РГ електроенергії в Україні зазначені об'єкти вже можуть справляти суттєвий негативний вплив на якість напруги, стійкість і безпеку систем електропостачання. Для потужних об'єктів РГ пріоритетною задачею є необхідність дотримання характеристик, що відповідають за забезпечення стійкості системи електропостачання. Для об'єктів малої потужності пріоритетною задачею є гарантування безпеки споживачів за найбільш простою процедурою під'єднання зазначених об'єктів до мережі у разі дотримання показників належної якості напруги і безперервності електропостачання.

Оцінка якості роботи енергосистем різного рівня та оптимальності їх побудови потребує критеріїв, які характеризували б відповідність поставленим вимогам. Існуючі підходи формулюються в основному в термінах електричної генерації, оскільки саме вона є найбільш придатною для створення централізованих систем. Базовими показниками адекватності генерування стосовно рівня споживання вважаються такі індекси, як очікувана втрата

навантаження *LOLE* (loss of load expectation), імовірність втрати навантаження *LOLP* (loss of load probability), частота втрати навантаження *LOLF* (loss of load frequency) та тривалість втрати навантаження *LOLD* (loss of load duration), а також індекс очікуваної недоданої енергії *EENS* (expected energy not served).

Розмірний показник *LOEE* (loss of energy expectation) (як правило, «МВт·год/рік») може бути нормалізований діленням на загальну спожиту енергію  $E_{\Sigma}$ . Концептуально показники визначаються виразами:

$$LOLE = \sum_{i \in S} p_i T_i, \quad LOEE_n = (\sum_k^n p_k E_k) / E_{\Sigma}, \quad (1)$$

де  $p_i$  чи  $p_k$  – ймовірність недостатньої потужності на  $k$ -му інтервалі часу чи в  $i$ -му стані;  $S$  – множина всіх станів системи, що асоціюються з втратою навантаження;  $T_i$  – тривалість стану;  $E_k$  – втрачена енергія навантаження, як недовиконана робота;  $n$  – кількість часових періодів (при дискретності за часом «год/рік»  $n=8760$ , для «днів/рік»  $n=365$ ).

Існують також інші способи оцінки надійності енергозабезпечення. Однак критерій *LOLE* сьогодні є найбільш використовуваним у світі для оцінки балансової надійності. Так, загальноприйнятий стандарт середнього числа днів дефіциту потужності у багатьох розвинених країнах дорівнює 0,1 діб/рік або 1 добі в 10 років (США), у Франції 3 год./рік, у Великобританії 4 год./рік, в Ірландії 8 год./рік.

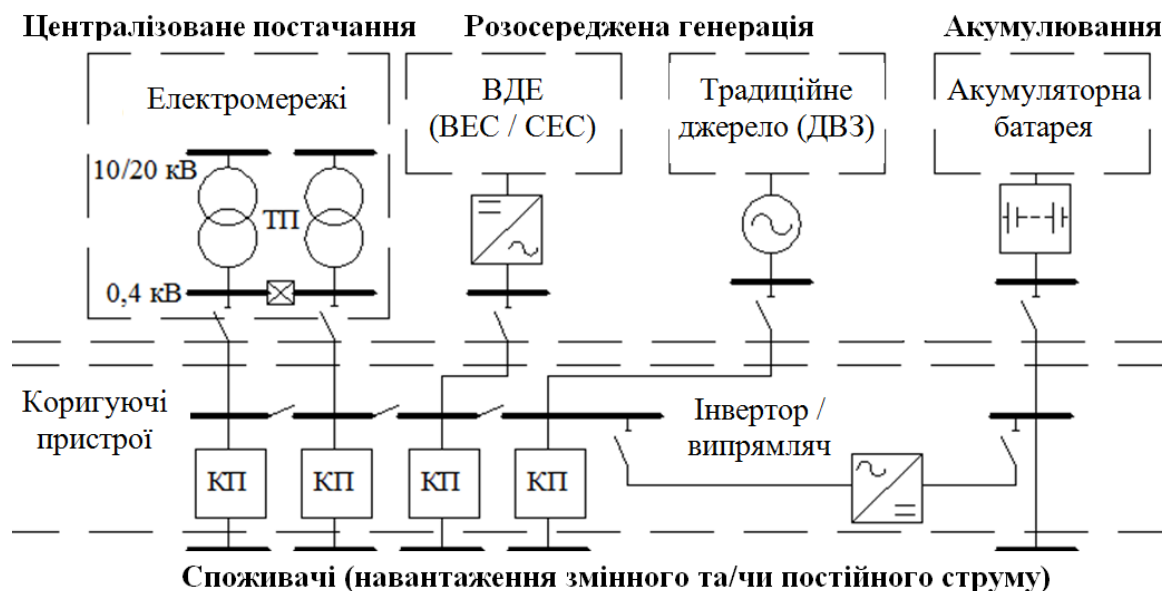
Розглянуті підходи були прийнятні для традиційних енергосистем на базі контрольованих джерел енергії. Але швидкий розвиток технологій генерації електроенергії на базі використання ВДЕ, які не мають гарантованого джерела первинного енергоносія, обумовив появу нових проблем у контексті забезпечення надійності. Поряд з можливістю дефіциту потужності виникає проблема можливого надлишку потужності при одночасному високому значенні поточної потужності на ВЕС та СЕС та мінімальних рівнях споживання. Коливання енергобалансу необхідно компенсувати за рахунок зміни потужності інших, традиційних джерел, для чого необхідна наявність додаткового діапазону регулювання.

Популярним для оцінки автономних та комбінованих електротехнічних систем з ВДЕ є індекс імовірної втрати живлення *LPSP* (loss of power supply probability). Нехай є сумарна поточна потужність генерування  $E_G(t)$ . Реальна потужність додатково визначається коефіцієнтом ефективності інвертора  $\eta_{inv}$ . Позначимо  $E_L(t)$  –потребу споживача (навантаження) в потужності в момент часу  $t$ . Можливі наступні варіанти – це наявність надлишкової енергії, що акумулюється, баланс чи дефіцит потужності. Дефіцит компенсується акумуляторною батареєю (АБ), наскільки дозволяє її ємність  $C_b$ . У такому випадку рівень дефіциту енергії на елементарному часовому інтервалі  $\Delta t$ :

$$LPS(t) = E_L(t) \cdot \Delta t - [E_G(t) \cdot \Delta t + C_b(t-1) - C_{b.min}] \cdot \eta_{inv}. \quad (2)$$

Індекс  $LPSP$  може бути визначений як відношення всієї нестачі енергії до загальної потреби на часовому інтервалі  $T = \sum_n \Delta t$ .

Оптимальною з точки зору впровадження РГ в ЕМ України є побудова локальної електротехнічної системи (ЛЕС) зі збалансованим енергопостачанням від комбінованих джерел РГ із забезпеченням надійної та стабільної їх роботи. Типова конфігурація ЛЕС із керованими джерелами енергії, окрім ВЕС та СЕС, або доступною електричною мережею представлена на рис.1.



КП - коригуючі пристрої, ВДЕ - відновлювані джерела енергії, ДВЗ – двигун внутрішнього згорання

Рисунок 1 - Структура електротехнічної системи з комбінованою генерацією по типу Microgrid

Критеріями роботи енергосистеми будуть не лише показники надійності, а й економічні та екологічні критерії. Критерій оптимізації, виходячи з найбільш уживаних вимог до комбінованих електротехнічних систем на базі ВДЕ, може мати наступні формулювання:

- сумарна генерована енергія практично дорівнює спожитій, тобто мінімізується математичне очікування небалансу;
- небаланс потужності має бути якомога меншим, тобто мінімізується дисперсія небалансів;
- резервне джерело має заданий режим роботи;
- обмеження по надлишку або дефіциту енергії;
- мінімізація вартості обладнання – такий критерій частіше виражається через детерміновані величини. Можливі і інші варіанти постановки задачі, залежно від мети та умов роботи системи.

Обмеження здатні вплинути на економічні показники ВЕС та СЕС, тому для об'єктів із ВДЕ істотним є попереднє моделювання можливих ситуацій та відповідна оптимізація встановлених потужностей.

Динаміка економічного розвитку України вимагає пошуку й розробки методів значного поліпшення якісного боку електрифікації, в тому числі в

розробці систем комбінованого й автономного електропостачання. На сучасному етапі широке практичне застосування ВДЕ може бути вирішене на основі узгодження параметрів електроенергії автономних джерел із навантаженням, забезпечення їх паралельної роботи, в тому числі з централізованою системою електропостачання. Так, у роботах фахівців Інституту електродинаміки НАН України (академік Кириленко О.В. та ін.) досліджено зміну керування та розвитку європейської системоутворюючої мережі. Одним із таких факторів зміни є масштабне впровадження мінливих ВДЕ. Для них істотними параметрами, що потребують дослідження, є поточна потужність, розподіл її імовірності, граничні значення; важливим також є темп зміни потужності. Для передбачення роботи енергосистеми в режимі неперервного часу науковцями Стокгольмського Королівського технологічного інституту КТН (M.Olsson, L.Soder і ін.) запропоновано моделювання змінних складових генерації та споживання на основі стохастичних диференціальних рівнянь. Вимога щодо поточного балансування сформульована як різниця між механічним виробництвом енергії  $P(t)$  і електричним навантаженням  $L(t)$ . Базове навантаження моделюється як сума функцій, що представляють середні значення навантажень і певний стохастичний процес:  $L(t) = \mu(t) + X(t)$ ,  $t \geq 0$ . Випадкова складова  $X(t)$ , що визначає девіацію функції навантажень, має задовольняти стохастичному диференціальному рівнянню типу Орнштейна-Уленбека:

$$dX(t) = -\beta X(t)dt + \sigma^* dB(t), \quad (4)$$

де  $B(t)$  є вінерівським процесом, а параметри  $\beta$  та  $\sigma^*$  визначають властивості девіацій.

Аналогічно формулюється модель неконтрольованої складової генерування електроенергії, зокрема вітрової.

Уточнення стохастичної моделі запропоновано в роботах науковців Інституту відновлюваної енергетики НАН України (Кузнєцов М.П. і ін.), зокрема вдосконалено представлення імовірнісної складової потужності ВДЕ. Функція миттєвої потужності  $P(t)$  в загальному випадку має вигляд:

$$P(t) = \omega(t) + \sigma \cdot \varepsilon + U(t), \quad (5)$$

де  $\omega(t)$  – осереднена крива, що імітує традиційну зміну впродовж доби;  $\sigma$  – стандартне відхилення середньодобових значень;  $\varepsilon$  – стандартна нормально розподілена випадкова величина;  $U(t)$  – випадковий процес, що стосується відхилень потужності від середньої в момент часу  $t$ .

Значна кількість досліджень стосується також моделювання стохастичної поведінки сонячної (фотоелектричної) генерації, зокрема виконаних в Національному технічному університеті України (КПІ ім. І.Сікорського).

Зазначені роботи відображають типові підходи до моделювання власне відновлюваної генерації. Однак стан енергобалансу локальної електротехнічної системи, як результуючий випадковий процес флуктуацій генерування та споживання, потребує додаткового дослідження, даючи як узагальнену

методологію, так і можливості адаптування до конкретних умов. Потребують вивчення такі аспекти, як достовірність оцінок, довірчі інтервали, узгодження з вимогами щодо надійності енергопостачання, оптимізація складу та режимів роботи генеруючого обладнання, потреби у системах регулювання (зокрема накопичення енергії), що необхідно для досягнення енергетичної та економічної ефективності. Зазначені питання є предметом дослідження даної дисертаційної роботи.

У другому розділі «Аналіз метеоданих, що характеризують роботу електротехнічних систем із комбінованою генерацією на базі ВДЕ в досліджуваному регіоні» аналізуються метеодані, що характеризують роботу сонячних та вітрових електростанцій у досліджуваному регіоні. Вихідні дані щодо вітроенергетики для південного регіону України взято за даними вимірів на Ботіївській ВЕС (багаторічний масив 10-хвилинних вимірів швидкості та напрямку вітру синхронно на висотах 66 та 94 м). Сонячна радіація оцінена як за доступними унормованими даними, так і фактичними даними в районі Токмацької СЕС (інтервал вимірів 30-хв.). Для аналізу було обрано репрезентативні місяці для різних пір року.

Для оцінки стохастичного розподілу вітрової енергії використано як характеристики власне вітру, так і енергетичний потенціал ВЕС. У даному дослідженні використано типову криву потужності ВЕУ умовно одиничної потужності. Загальна форма кривої потужності має вигляд:

$$P_1(v) = \begin{cases} 0, & v < V_0, v \geq V_m \\ P(v, a_1, a_2, \dots), & V_0 \leq v \leq V_P \\ P_W, & V_P < v < V_m \end{cases} \quad (6)$$

де  $v$  – поточна швидкість вітру,  $V_x$  – граничні значення (м/с);  $P_W$  – номінальна потужність (кВт).

Для опису щільності розподілу швидкості вітру використано розподіл Вейбула:  $f(v) = \frac{\gamma}{B} \left(\frac{v}{B}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{B}\right)^\gamma\right]$ , де  $B$  і  $\gamma$  – параметри масштабу і форми. Для оцінки потенційної продуктивності ВЕУ з відповідною висотою осі ротора розраховано середню швидкість вітру  $V_c$  та потужність  $P_c$  за розподілом Вейбула та по фактичних значеннях швидкості вітру, а також середньоквадратичне відхилення  $\sigma$  (СКВ), на 10-хвилинних інтервалах (табл. 2).

Таблиця 2

Параметри вітрового потоку на висоті 94 м

Місяць	$V_c$ , м/с	$\sigma$ , м/с	$\gamma$	$B$ , м/с	$P_c$ (Вейб.)	$P_c$ факт.
Січень	7,43	3,46	1,94	8,40	0,39	0,41
Квітень	7,98	3,59	2,34	9,00	0,43	0,44
Липень	6,23	2,62	2,51	7,01	0,27	0,28
Жовтень	9,32	4,14	2,37	10,52	0,53	0,58

Середня похибка за розподілом Вейбула на висоті 94 м приблизно дорівнює 4%, а на висоті 66 м – 2%. Різниця може вважатися статистично незначною, а залежність розподілу швидкості вітру від висоти має ознаки стаціонарності.

На рис. 2 зображено приклад запису швидкості вітру на двох висотах, де можливі навіть ситуації інверсійних значень швидкості вітру (інтервали 95-110), хоча кореляційна залежність поточних значень досить висока – на рівні 0,95-0,97 для досліджених даних.

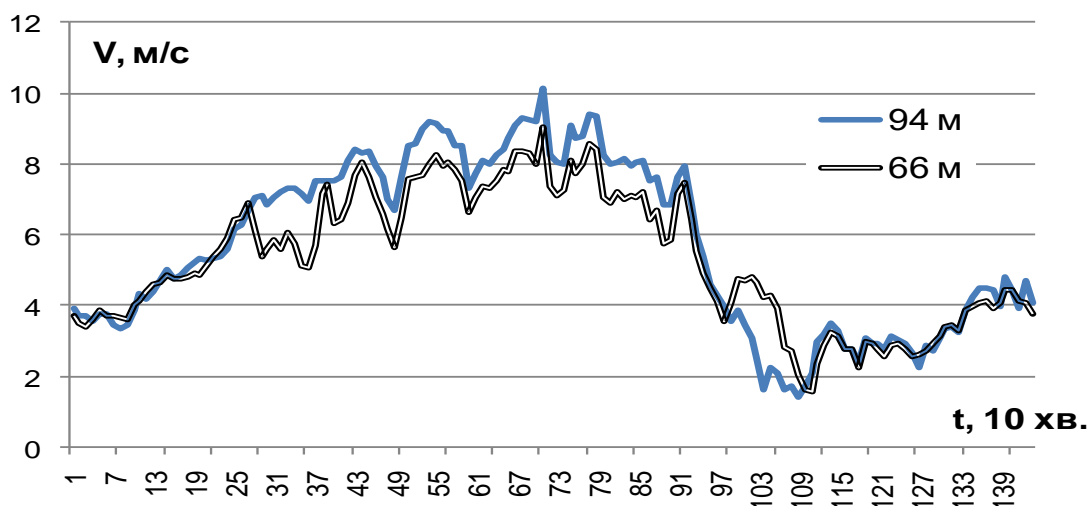


Рисунок 2 - Добовий графік швидкості вітру на різних висотах.

Важливою характеристикою вітрового режиму є його поривчастість, у даному випадку темп зміни швидкості вітру за короткий часовий проміжок. Математичне очікування стрибків потужності ВЕУ близьке до нуля, а їх розподіл має ознаки симетрії. Припускаючи нормальність розподілу величини стрибків потужності ВЕУ, знаходимо максимальну амплітуду стрибків потужності ВЕУ (табл. 3) з імовірністю 0,99 (квантиль нормального розподілу 2,58) та з імовірністю 0,95 (квантиль 1,96).

Таблиця 3

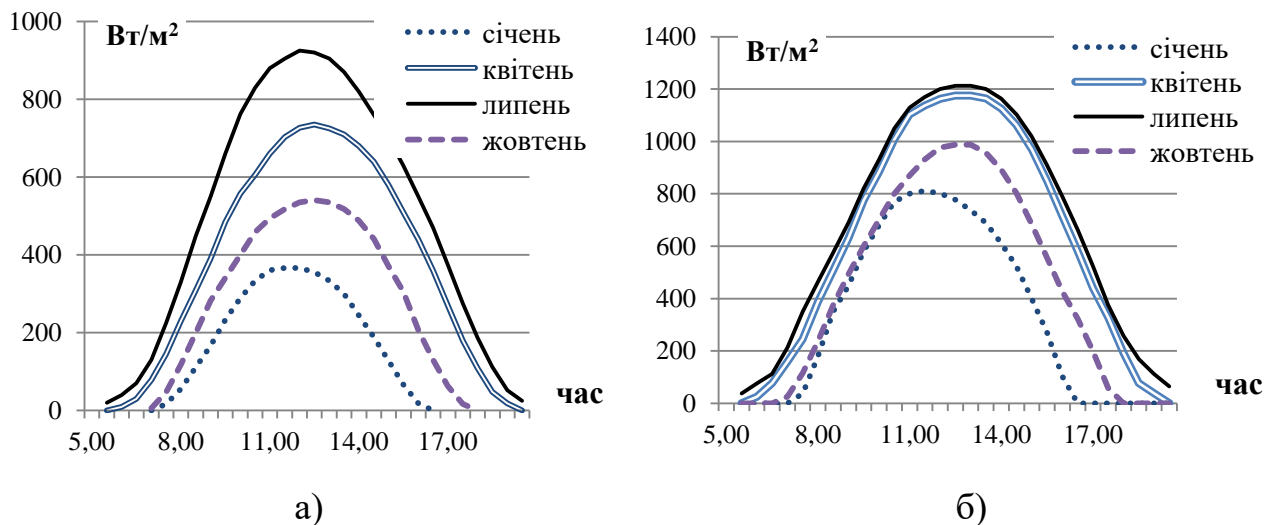
Показники розподілу стрибків потужності ВЕУ (висота 94 м)

Місяць	$\Delta P_{\max}$	$\Delta P_{\min}$	$2,58 \cdot \sigma$	$1,96 \cdot \sigma$
Січень	0,39	-0,45	0,15	0,12
Квітень	0,47	-0,45	0,17	0,13
Липень	0,37	-0,55	0,16	0,12
Жовтень	0,46	-0,56	0,13	0,10

Значні стрибки потужності ВЕУ (більше половини номінальної потужності) мають характер окремих викидів, і вже при відсіюванні 1% екстремальних значень (симетрично по 0,5% додатних та від'ємних) розмах стрибків становить до 0,17 номінальної потужності ВЕУ, а при відкиданні 5% – 0,13 номінальної потужності. Імовірність 0,95 тут розглядається як загальноприйнятний показник, імовірність 0,99 демонструє вплив даних, що мають нетиповий характер.

Результати підрахунку фактичних даних вказують на дещо вищі показники елементарних стрибків потужності, ніж розраховані за нормальним розподілом. Тут фактичний розподіл відповідає нормальному за параметром симетрії, проте не відповідає за параметром ексцесу. Основні закономірності розподілу справедливі на різних висотах. Зі зростанням довжини часового інтервалу імовірність тривалого зростання чи спаду потужності зменшується.

Щодо рівнів сонячної радіації, дані багаторічних спостережень вказують на значну відмінність у різні пори року (рис. 3а). Натомість максимальні освітленості мають меншу відмінність (рис. 3б). Основним фактором є наявність слідкуючої (трекерної) системи, що частково нівелює різницю у висоті сонця над горизонтом.



а) – середній для даного місяця; б) – максимально досяжний.

Рисунок 3 - Доступний рівень інсоляції

Традиційна модель потужності СЕС (чи фотомодуля) описується формулою:  $P_{PV} = \eta_{PV} A_{PV} \rho$ , де  $A_{PV}$  – площа фотопанелей ( $\text{м}^2$ );  $\rho$  – сонячна радіація ( $\text{Вт/м}^2$ );  $\eta_{PV}$  – коефіцієнт ефективності, залежний від температури модуля та повітря. Показником сонячної енергії можна вважати величину:  $k_s = P(\rho) / P_n$ , де  $P(\rho)$  – поточна потужність фотомодуля (ФМ) в залежності від  $\rho$  – рівня сонячної радіації;  $P_n$  – номінальна потужність ФМ. Тоді значення  $k_s = 1$  відповідатиме теоретично максимальній потужності модуля, а  $k_s = 0$  – повній темноті. Крім  $k_s$ , важливим є нормалізоване відхилення ( $k_t$ ), що визначає варіативність сонячної радіації. Дані попереднього аналізу мінливості для характерних місяців наведено в табл. 4.

Гістограма стрибків потужності показує, що значні зміни (більше половини номінальної потужності) мають характер окремих викидів, і вже при відсіюванні 1% екстремальних значень розмах стрибків становить близько 0,18 номінальної потужності СЕС, а при відкиданні 5% – 0,14 номінальної потужності. Основна маса стрибків потужності зосереджена в межах 30% номінальної потужності ФМ, проте розмах їх затухає повільно, що відповідає завищеним значенням ексцесу.



Таблиця 4

## Показники нормалізованої потужності ФМ

Показник	січень	квітень	липень	жовтень
Час інсоляції	7.30-16.00	6.00-19.00	5.30-20.00	7.00-17.30
Математичне сподівання $k_s$	0,19	0,32	0,38	0,26
СКВ $k_s$	0,22	0,28	0,28	0,25
Математичне сподівання $k_t$	0,38	0,58	0,69	0,51
СКВ $k_t$	0,34	0,28	0,22	0,34
Максимальна зміна, $\Delta k_{s \max}$	0,49	0,63	0,65	0,57
СКВ змін потужності	0,10	0,15	0,16	0,13

При зростанні часового діапазону вдвічі розмах змін потужності ФМ зріс незначно, на 10-15%. Показники різних сезонів також досить близькі. Отже, імовірність тривалого зростання чи спаду потужності є невисокою, тобто потужність ФМ як випадковий процес можна вважати близьким до стаціонарного, з істотними коливаннями в діапазоні до однієї години.

Для сумарної потужності ВЕС та СЕС використано приведений показник відносної потужності:

$$k_{\Sigma} = \alpha_1 \cdot k_w + \alpha_2 \cdot k_s, \quad (7)$$

де  $\alpha_i$  – вагові коефіцієнти, пропорційні номінальним потужностям відповідних станцій. Тут відносна потужність ВЕС  $k_w$  визначається аналогічно до  $k_s$ . Прийнято  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ .

При складанні потужностей як випадкових величин враховуємо, що математичне сподівання дорівнює сумі середніх значень, а дисперсія – сумі дисперсій плюс коваріація, тобто важлива кореляція доданків.

Для прикладу середня потужність, СКВ та коефіцієнт кореляції однакових за номінальною потужністю ВЕС та СЕС ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$ ) наведені в табл. 5.

Таблиця 5

## Осереднені показники потужності ФМ та ВЕУ, в.о.

Параметр	станція	січень	квітень	липень	жовтень
Середня потужність	ВЕС	0,41	0,44	0,28	0,56
	ФМ	0,17	0,33	0,38	0,26
	сумарна	0,24	0,32	0,26	0,35
СКВ	ВЕС	0,33	0,36	0,27	0,37
	ФМ	0,22	0,28	0,28	0,25
	сумарна	0,17	0,21	0,19	0,21
Коефіцієнт кореляції потужності ВЕУ та ФМ	сумарна	-0,28	-0,08	-0,05	-0,15

Розкид значень при складанні двох випадкових величин помітно зменшується. Цьому сприяє також від'ємність коефіцієнта кореляції, хоча загалом ці величини можна вважати слабо корельованими або ж незалежними. Щоправда,

взимку кореляція дещо помітніша – більше сонячних днів приходиться на безвітряну погоду. Тривалість періодів з надто низькою чи зависокою потужністю важлива для визначення потреби в акумулюванні енергії.

Для прикладу розглядаються кумулятивні значення небалансу виробленої енергії, визначені по формулі:

$$\Delta(t)=[k_{\Sigma}(t)-k_{\text{середнє}}]+\Delta(t-1) \quad (8)$$

де одиничний часовий крок  $t - 0,5$  год.

За небаланс прийнято величину відхилення поточного значення від середнього ( $k_{\text{середнє}}$ ) як фіксованого рівня споживання, а небаланс розраховується з початку кожної доби (прийнято гіпотезу циклічної інваріантності). Розподіл небалансів протягом року близький до нормального (рис. 4).

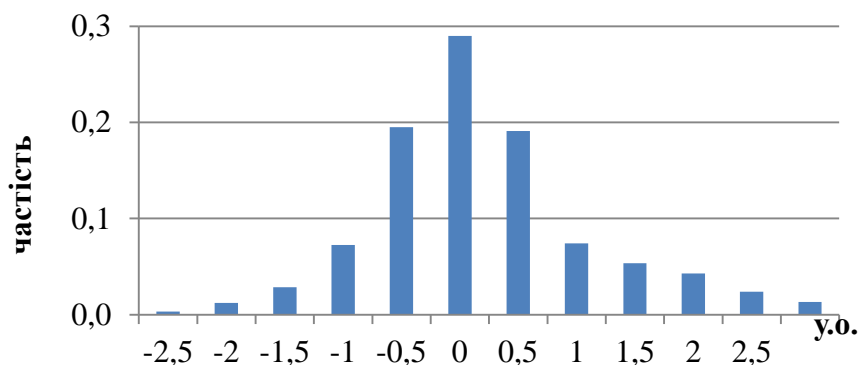


Рисунок 4 - Розподіл відхилень поточної потужності від середньої ( $\alpha_1=\alpha_2=0,5$ )

Досліджено імовірний розкид значень небалансу для різних конфігурацій вітро-сонячних електростанцій (ВСЕС) протягом денного часу при довірчих ймовірностях 0,99 та 0,95. Відкидання по 2,5% значень зменшує розкид небалансу (відхилення від середнього) на 16% для однотипних генерацій (тільки ВЕС або СЕС), та на 20% для змішаної генерації. По показнику коефіцієнта варіації  $C_v$ , тобто відносного рівня відхилень, цей ефект значно помітніший.

За результатами статистичного аналізу фактичних даних запропоновано математичні моделі поточної потужності ВДЕ. Для математичного моделювання миттєвої потужності ВЕС застосовано представлення миттєвої потужності у вигляді (5) як трендової кривої для певного сезону, середньодобового значення як випадкової величини та поточних змін як випадкового процесу. Для моделювання роботи ВЕС застосовано представлення короткотермінових змін  $U(t)$  як випадкового процесу типу (4):

$$U(t_k) = U(t_{k-1}) \cdot e^{-\beta \Delta t} + \frac{\sigma^*}{\sqrt{2\beta}} \sqrt{1 - e^{-2\beta \Delta t}} \cdot \varepsilon, \quad (9)$$

де  $\Delta t$  – елементарний інтервал часу,  $\Delta t = t_k - t_{k-1}$  (як правило, 10-15 хв.);  $\sigma^*$  – волатильність, а  $\beta$  – величина зносу випадкового процесу.

Параметри процесу визначаються за набором фактичних даних. Єдиних правил розрахунку  $\beta$  та  $\sigma^*$  немає, підходи до їх вибору мають узгоджуватись з характером даного процесу.

Математична модель поточного рівня сонячної радіації як випадкового процесу, змінного в часі впродовж доби, прийнята у вигляді:

$$y_i(t_j) = u_i(t_j)[1 + C_v \cdot \varepsilon(i)] + b \cdot [x(j) - 0,5] \leq Y_i(t_j), \quad (10)$$

де  $y_i$  – рівень сонячної радіації ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ )  $i$ -го сезону (місяця, дня);  $j$  – номер часового інтервалу впродовж дня (час  $t_j$  – середина  $j$ -інтервалу);  $u_i(t)$  – осереднена для даної пори крива (математичне сподівання інтервалу);  $C_v$  – коефіцієнт варіації середньодобового рівня;  $b$  – розмірний параметр ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), що має забезпечувати визначений розмах поточних флуктуацій;  $x(j)$  – рівномірно розподілена випадкова величина ( $0 < x < 1$ ), яка задається окремо для кожного часового інтервалу.

При моделюванні потужності СЕС в якості випадкової величини виступає не рівень інсоляції ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), а відносна потужність ФМ  $k_s$  (в.о.).

Порівняння модельованих та фактичних значень вказує на високу збіжність результатів. При цьому сумарна вироблена за місяць енергія за математичними моделями відрізняється від можливої за фактичними даними на 1-3%. Такі моделі можуть вважатися адекватними.

**У третьому розділі «Обробка даних, що характеризують споживання електричної енергії в електротехнічних системах в досліджуваному регіоні»** досліджено дані, що характеризують споживання електричної енергії в досліджуваному регіоні. Впровадження ВДЕ та їх інтегрування до енергосистем різних рівнів локальності супроводжується потребами в додатковому узгодженні режимів генерування та споживання електроенергії. Вітрова та сонячна енергія суттєво залежить від погодних факторів, разом з тим споживання також містить елементи випадковості. Для південного регіону (території Запорізької обл.) проведено ряд досліджень щодо режимів надходження вітрової та сонячної енергії; для виявлення можливостей узгодження генерації ВДЕ зі споживанням виконано аналогічні дослідження графіків навантаження (споживання). Аналіз випадкових складових графіків споживання електроенергії проведено на прикладі багаторічних даних для кількох населених пунктів та місцевих підприємств Мелітопольського району Запорізької області.

Простий розгляд даних щодо споживання електричної енергії свідчить, що у рівнях споживаної потужності простежуються певні закономірності, проте присутня і цілком випадкова складова у вигляді хаотичних відхилень від загального тренду. Першим кроком є впорядкування вихідних даних. Дані про рівень споживання звичайно представлені як послідовність значень потужності, отриманих осередненням за певним часовим інтервалом (рис. 5), кожен набір конкретних даних можна вважати випадковою вибіркою.

Головні статистичні характеристики випадкового процесу: середні значення, дисперсії, щільність імовірності, коваріаційні функції, спектральні щільності, тощо. Якщо мова йде про два випадкові процеси – споживання електроенергії та її генерування ВДЕ – то можуть розглядатися сумісні щільності

розподілу та взаємні коваріації (кореляційні функції). Аналіз процесу включає виділення періодичної складової, а початкові дані можуть бути агреговані як набори добових значень, об'єднаних у групи за певними ознаками.

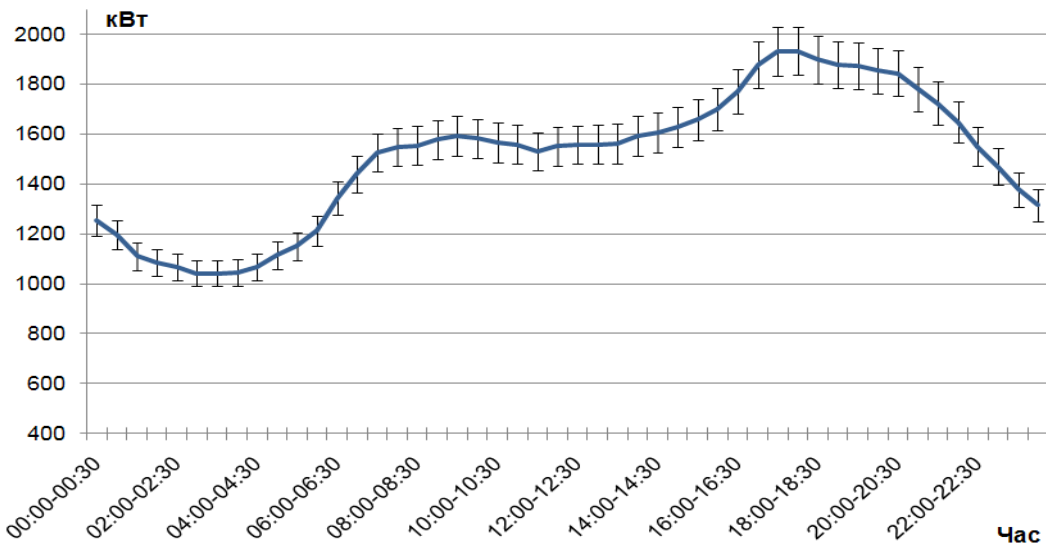


Рисунок 5 - Приклад добового ходу споживання електроенергії населеним пунктом

Набір послідовних даних є дискретним ланцюгом (послідовністю випадкових величин) з практично зліченною множиною значень. За рядом ознак він подібний до ланцюга Маркова. Щоб дискретна реалізація містила всі зміни, що є у неперервному процесі, на кожен цикл повинно припадати щонайменше два виміри, тому сформульовано певні вимоги до способів агрегування даних.

У даній роботі, з урахуванням сезонних змін, прийнято вважати місячний термін достатньо стаціонарним в сенсі статистичних характеристик, а для розрахунку окремих параметрів достатньо використовувати кілька добових записів (за умови їх некорельованості). З урахуванням цих обставин прийнято представлення функції миттєвої потужності споживання  $P(t)$ , аналогічне (5), або для групи споживачів

$$P^{(i)}(t) = \omega^{(i)}(t) + \sum_j^n \sigma_{ij} \varepsilon_j + U^{(i)}(t). \quad (11)$$

Набір даних про споживання електроенергії сусідніх населених пунктів має високу кореляцію, що свідчить про типовий режим споживання населенням впродовж доби (табл.6).

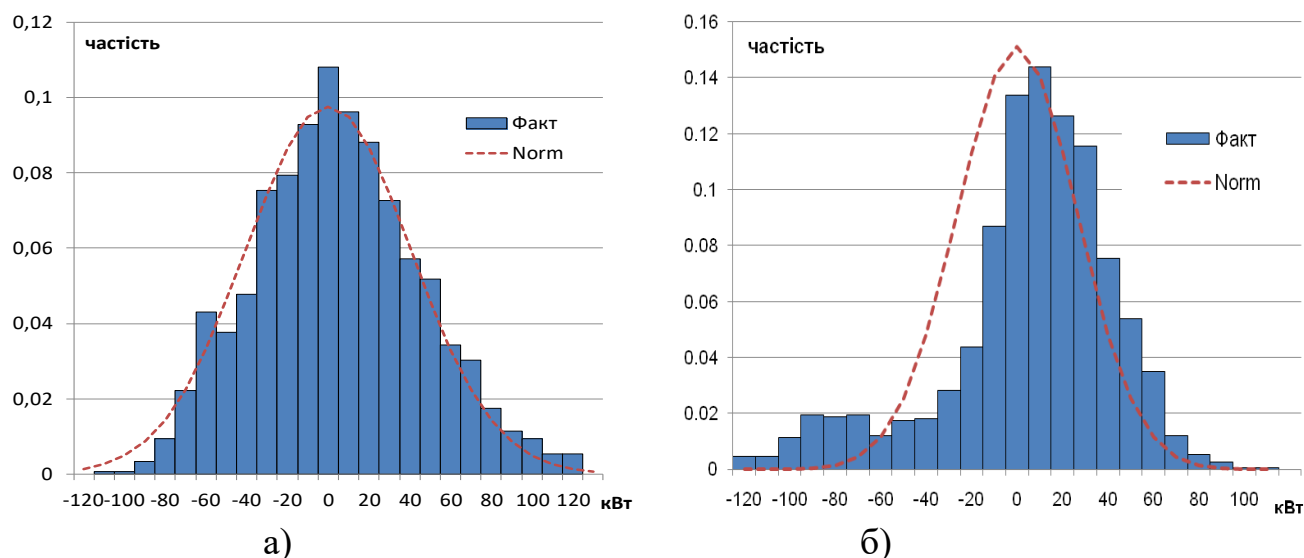
Таблиця 6

Кореляція відхилень від середньої потужності

Підстанція	Терп. Т1	Терп. Т2	Морд. Т1	Морд. Т2
Терпіння Т1	1	0,23	0,19	0,19
Терпіння Т2	0,23	1	0,40	0,22
Мордвинівка Т1	0,19	0,40	1	0,42
Мордвинівка Т2	0,19	0,22	0,42	1

Однак короткотермінові зміни мають, як правило, статистично незначиму кореляцію (деякі місяці мали нульові і навіть від’ємні значення). Отже, запропоновану модель випадкового процесу можна вважати обґрунтованою.

При моделюванні режимів споживання енергії важливим показником є характер розподілу значень потужності як випадкової величини. Формули (5), (9) передбачають нормальність розподілу як середньодобових показників, так і середньомісячних (рис. 6а). Дана теза підтверджується для всіх місяців досліджуваного періоду. Щоправда, для літніх місяців властива деяка негативна асиметрія, тобто переважання амплітуди від’ємних відхилень (рис. 6б).



а) – січень; б) - липень

Рисунок 6 - Приклади розподілу 30-хвилинних відносних змін потужності споживання

Отримані результати стосуються населених пунктів, у яких рівень споживання формується значною кількістю незалежних користувачів електричної енергії. Для порівняння розглянуто також характер споживання господарюючими суб’єктами типу малих підприємств. Для прикладу розглянуто птахофабрику (с.Новоолексіївка) та завод з виробництва питної води (смт. Мирне). Коефіцієнт варіації споживання для птахофабрики знаходиться на рівні 0,1, як і для населених пунктів. Для заводу варіація дещо вища, але там значна відмінність між окремими днями, що свідчить більше про неритмічність виробничого процесу, аніж про поточні флуктуації усталеного режиму. Птахофабрика, де виробничий цикл потребує постійної роботи обладнання, має стабільні показники споживання протягом робочого часу; зміщуються лише максимумами відповідно до зміни пір року. Натомість для заводу існує значна різниця в режимах роботи окремих днів.

Якщо розглядати синхронне порівняння рівнів споживання енергії та поточної потужності умовних ВЕС та СЕС, розташованих у цьому регіоні, бачимо незалежність (чи слабку кореляцію) випадкових процесів, що описують поточні флуктуації навантаження та генерації. Як вихідні дані споживання, крім кількох населених пунктів (н.п.) Запорізької області, використано статистичну інформацію про роботу Дніпровської енергосистеми (ДнЕС) та ОЕС України в

цілому. Фактичні дані, отримані в процесі експлуатації, зазвичай оформлено у вигляді часових рядів. Для забезпечення стаціонарності часового ряду, як бажаної умови моделювання, виконано певну декомпозицію початкового ряду. Якщо центрувати поточні флуктуації та врахувати їх математичні сподівання введенням звичайної випадкової величини (постійної в межах доби) як середньодобового відхилення, забезпечується не лише стаціонарність, а й ергодичність результуючого випадкового процесу, що підтверджує справедливості представлення (5) чи (9). Тут добовий хід визначає не випадкову центруючу функцію, середнє добове значення – дискретний процес, а поточна девіація  $U(t)$  – стохастичний неперервний процес. Таке представлення можна вважати розкладом Леві для процесу з незалежними приростами. Модель авторегресії дає дещо завищений розкид випадкових відхилень (збурень процесу). Натомість моделювання стохастичним диференціальним рівнянням Орнштейна-Уленбека забезпечує кращий результат, придатний для часових інтервалів від кількох діб до місяця. У загальному випадку коефіцієнти рівняння (4) можуть бути функціями, тоді воно матиме вигляд рівняння Іто:

$$dX(t) = \beta(x, t)dt + \sigma(x, t)\delta B. \quad (12)$$

Очевидно, розраховані параметри рівняння залежатимуть від обраної вибірки, і для стаціонарного процесу матимуть близькі значення. У цьому сенсі можна говорити про стійкість розрахункових значень. Це важливо при імітаційному моделюванні та методах типу Монте-Карло. Насправді характеристики випадкового процесу можуть мати сезонну (річну) циклічність, тому резонно моделювати окремі інтервали часу, яким притаманна стаціонарність – наприклад, помісячно чи посезонно.

Збіжність розрахункових параметрів у залежності від довжини випадкової вибірки як для окремих н.п., так і їх групи, має подібну поведінку при використанні статистичних даних за різні місяці (приклад збіжності на рис.7).

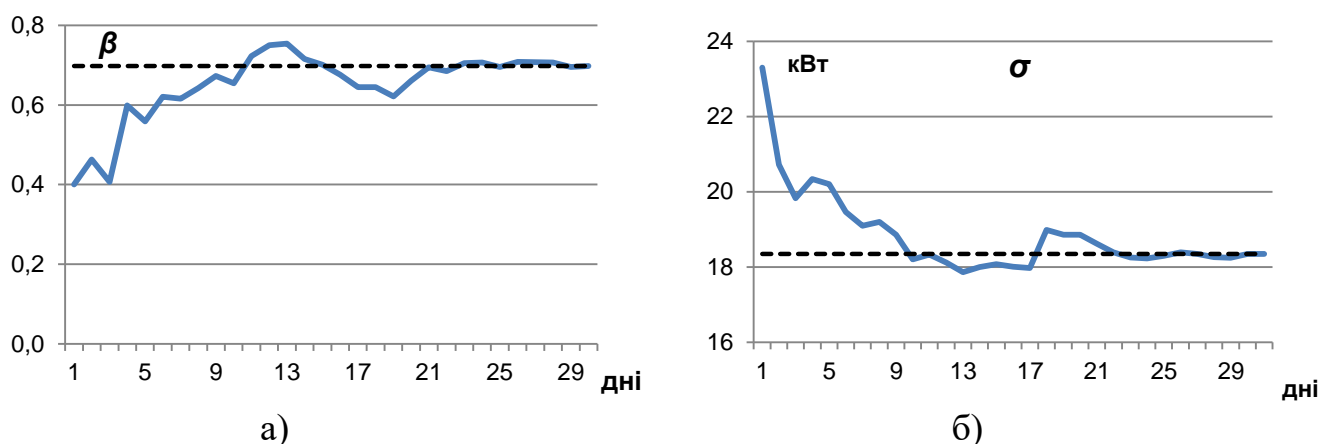


Рисунок 7 - Розрахункові значення параметрів  $\beta$  (а),  $\sigma$  (б) залежно від тривалості вибірки

Місячний обсяг даних видається достатнім для досягнення статистично значимого результату. Помітно, що при об'єднанні групи споживачів, розкид параметрів очікувано зменшується. Вигляд функції розподілу волатильності краще відповідає гіпотезі нормальності при зростанні масштабу споживання. Натомість розподіл параметра зносу, близький до нормального для малих споживачів, при зростанні розміру масштабу енергосистеми краще описується розподілом Вейбула (рис.8).

Аналітична оцінка функції розподілу ускладнена і не завжди можлива. Перевірку адекватності моделі краще виконувати, порівнюючи статистичну вибірку з набором імітацій процесу, використовуючи існуючі критерії узгодженості (Пірсона, Колмогорова, тощо).

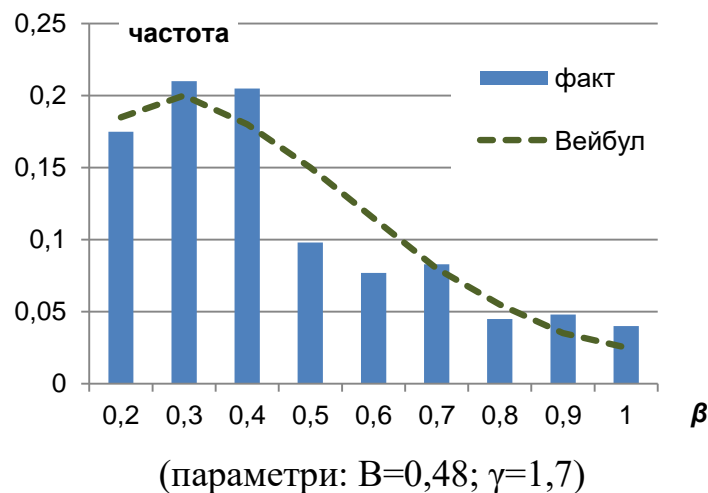


Рисунок 8 - Щільність розподілу параметра зносу для групи населених пунктів

Розподіл випадкових значень параметрів моделі для крупної (регіональної та об'єднаної) енергосистеми аналогічний тому, що спостерігався для окремих населених пунктів, а саме: несиметричний розподіл зносу та нормальний – волатильності. Порівняння фактичних даних та випадкових реалізацій імітаційної моделі за методом Монте-Карло свідчить про адекватність запропонованої математичної моделі.

У четвертому розділі «Побудова критеріїв та системи обмежень, що визначають енергетичну ефективність застосування комбінованої генерації» розглядається побудова критеріїв та системи обмежень, що визначають оптимальність функціонування вітро-сонячної генерації. Сформульовано проблеми відновлюваної енергетики, які потребують вирішення оптимізаційних задач. Зроблено загальний огляд методів оптимізації, підкреслено прийнятні підходи для вирішення поставлених задач. Зокрема, це побудова поверхні відгуку при імітаційному моделюванні, цілочисельні методи для модульних систем, числові методи.

Запропонована класифікація задач оптимізації в умовах невизначеності, притаманних енергосистемам з ВДЕ, вказано відмінності за цільовими функціями, за характером обмежень і за видом рішення. Так, як цільову функцію може бути

використано математичне очікування деякої функції від розв'язку, дисперсія, імовірність попадання розв'язку в деяку область, мінімальне (максимальне) значення деякої функції, комбінація будь-якої сукупності відповідних моделей, і т.ін. Аналогічно можна класифікувати задачі за характером обмежень: якщо обмеження повинні виконуватися при всіх реалізаціях параметрів, то вони будуть детермінованими; якщо розбіжності не перевищували заданих з певною вірогідністю, то обмеження будуть імовірнісними; можлива заміна жорстких обмежень їх усередненням, такі обмеження будуть статистичними. Наведено варіанти постановок задач стохастичного програмування, які можуть бути застосовані до енергосистем комбінованого типу. Наприклад, визначено цільову функцію  $f(x, \omega)$ , яка виражає ефективність плану для певних  $x$  та  $\omega$ . Тоді задачу визначення оптимального детермінованого плану  $x$  за випадкових параметрів  $\omega$  можна сформулювати у таких варіантах:

- $\max M[f(x, \omega)]$  за умов:  $P\{g(x, \omega) \leq 0\} \geq 1 - \gamma, x \geq 0, \omega \in \Omega;$
- $\max \xi$  за умов:  $P\{f(x, \omega) \geq \xi, g(x, \omega) \leq 0\} \geq 1 - \gamma, x \geq 0, \omega \in \Omega.$

Тут параметр  $\gamma$  визначає довірчий рівень. Строга математична постановка задачі стохастичної оптимізації повинна містити опис властивостей та метрики досліджуваного простору фізичних параметрів, де визначено:  $(\Omega, G, P)$  - досліджуваний імовірнісний простір;  $\Omega$  - множина подій, на яких визначена ймовірність  $P$ ;  $G$  утворює  $\sigma$ -алгебру подій;  $\omega$  - елементарна подія, яка представляє собою відповідний випадковий процес при фіксованих значеннях всіх початкових параметрів,  $\omega = \omega(u, v), u \in U, v \in V$ , де  $U, V$  - сукупність параметрів управління і стану.

Запропоновано використання як критерій оптимізації таких індексів, *LOLE*, *WE*, *LPS* і ін., частково описаних в розд. 1. Баланс потужності в автономній енергосистемі представлено у вигляді:

$$P_{\Delta}(t) = P_{Ren}(t) + P_{Ak}(t) - P_L(t), \quad (13)$$

де  $P_{Ren} = P_W + P_{PV}$  - потужність відновлюваних джерел енергії (вітру та сонця), що мають випадкову природу;  $P_{Ak}$  - потужність (стан зарядки) акумуляторної батареї;  $P_L$  - потужність навантаження (споживання). Зазначені потужності є функціями часу.

Критерій оптимізації (цільова функція), виходячи з вимог до комплексних енергосистем на базі ВДЕ, може мати наступні формулювання:

- 1) сумарна генерована енергія дорівнює спожитій, мінімізується математичне очікування небалансу:  $M(P_{\Delta}) \rightarrow \min$  або  $M(P_{\Delta}) = 0$  (М-модель);
- 2) значення небалансу потужності мають бути якомога меншими:  $D(P_{\Delta}) \rightarrow \min;$
- 3) передбачено резервне джерело (наприклад, дизель-генератор чи міні-ГЕС) з заданим режимом роботи:  $P_{\Delta} = f_D(t)$  (А-модель);
- 4) обмеження по надлишку енергії, тобто по втратах генерування:  $\min(\max P_{\Delta})$ , або обмеження по дефіциту енергії, тобто по втратах споживання:  $\max(\min P_{\Delta})$  (ММ-моделі);



5) мінімізація вартості обладнання (детермінований критерій):

$$C_W \cdot P_W^0 + C_{PV} \cdot P_{PV}^0 + C_{Ak} \cdot P_{Ak}^0 \rightarrow \min, \quad (14)$$

де  $C_x$  – питома вартість відповідного обладнання  $P_x^0$  – номінальні потужності.

Якщо критерієм є собівартість електроенергії, то цільова функція:

$$f(T) = \int_0^T \sum_i^N c_i y_i(t) dt \rightarrow \min, \quad (15)$$

де  $c_i$  – питома вартість одиниці електричної енергії від  $i$ -го генеруючого елемента (чи групи елементів) певного типу;  $y_i(t)$  – кількість одиниць електричної енергії, отриманої від  $i$ -го елемента;  $N$  – кількість елементів;  $T$  – час експлуатації.

Фізичні обмеження у вигляді рівнянь стану мають вигляд енергетичних характеристик для відповідних джерел (6) та (10), і є детермінованими функціями випадкових величин. Для акумуляторної батареї фізичні обмеження детерміновані:  $P_{Ak}^{min} \leq P_{Ak}(t) \leq P_{Ak}^{max}$ .

Якщо незалежною змінною вважати поточне значення потужності, то при відомій функції розподілу власне потужності  $f_P(p)$  вироблена чи спожита електроенергія як цільова функція визначатиметься формулою:

$$E(T) = T \int_0^{\infty} p \cdot f_P(p) dp, \quad (16)$$

де інтеграл визначає математичне сподівання потужності на часовому інтервалі  $T$ .

Функція щільності розподілу процесу балансування може бути визначена статистичною обробкою історичних даних і носити характер, притаманний даній випадковій вибірці, або визначена аналітично за умов стаціонарності та незалежності процесів:

$$f_{G-L}(p) = f_{\Delta P}(p) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{PG}(x) \cdot f_{PL}(p-x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f_{PG}(p-x) \cdot f_{PL}(x) dx, \quad (17)$$

де  $f_{PG}$  та  $f_{PL}$  – функції розподілу потужностей генерування та навантаження.

Виконано приклади розрахунку оптимальних параметрів ЛЕС. Система містить контрольовані джерела енергії (електромережу, дизель-генератори, малі ГЕС, тощо), плановий графік роботи яких відповідає середньому рівню споживання та додаткової генерації ВДЕ. Це дає змогу оцінити вплив стохастичної складової, яка є головним проблемним фактором для вітрової та сонячної енергетики. В силу припущення про нормальність розподілу випадкових флуктуацій (див. рис. 6) результуючий небаланс також матиме нормальний розподіл. Отже, для формул (17) можна вважати:

$$f_{\Delta P}(p) = F'_{\Delta P}(p) = \frac{1}{\sigma_{\Delta} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{p^2}{2\sigma_{\Delta}^2}\right), \quad \sigma_{\Delta} = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2}, \quad (18)$$

де складові дисперсії (СКВ) стосуватимуться досліджуваного часового періоду.

Після інтегрування (2), (3) для розподілу Гауса можна отримати:

$$WE(T) = |LPS(T)| = \frac{\sigma_{\Delta} T}{\sqrt{2\pi}} \approx 0,4\sigma_{\Delta} T. \quad (19)$$

Тут результати для  $WE$  та  $LPS$  збігаються в силу симетрії розподілу імовірності. Імовірність того, що небаланс перевищує рівень  $p_1$  (кВт), визначається формулою:

$$EXC = \int_{p_1}^{\infty} f_{\Delta P}(p) dp = 1 - F_{\Delta P}(p_1) = 1 - \Phi\left(\frac{p_1}{\sigma_{\Delta}}\right). \quad (20)$$

Обернена задача дозволяє знайти максимальну потужність небалансу при заданій довірчій імовірності. У табл. 7 наведено приклад розрахунку для населеного пункту (див. розд. 3) при різних комбінаціях потужностей ВЕС ( $W$ , кВт) та СЕС ( $S$ , кВт), порівнюються результати моделювання та фактичних вимірів. Результати залежать від того, з якою точністю прогнозовано середню потужність споживання. Табл. 7 стосується добового прогнозування.

Таблиця 7

Імовірність граничних значень небалансу потужності (кВт)

Критерій	Спосіб визначення	$W=0$ кВт, $S=0$ кВт	$W=200$ кВт, $S=200$ кВт	$W=200$ кВт, $S=0$ кВт	$W=0$ кВт, $S=200$ кВт	$W=100$ кВт, $S=100$ кВт
$\sigma_{\Delta}$ , кВт	виміри	35,3	64,4	63,3	38,7	45,8
Імовірність 0,8 (кВт)	розрахунок	45	86	81	55	60
	виміри	45	85	83	56	62
$ P_{\Delta}  > 80$ кВт (імовірність)	розрахунок	0,012	0,116	0,104	0,030	0,044
	виміри	0,011	0,117	0,109	0,024	0,042

На рис. 9 зображено розподілу небалансів потужності для обраного прикладу. Імовірність позитивних подій, тобто змін одного знаку та негативних (змін різного знаку) приблизно однакова і має нормальний розподіл. Наявність тривалих часових проміжків з небалансом одного знаку дещо вища, ніж теоретично мала б бути при повній незалежності суміжних подій (рис. 10).

Відмінності факту й моделі помітні для небалансу малої тривалості. Поведінка небалансу як випадкового процесу ближча до процесу Орнштейна-Уленбека, аніж до «білого шуму».

У п'ятому розділі «Розрахунок показників балансової надійності та їх довірчих інтервалів електротехнічних систем із комбінованою генерацією» наводяться методологія та приклади розрахунку показників балансової надійності та їх довірчих інтервалів для локальних електротехнічних систем.

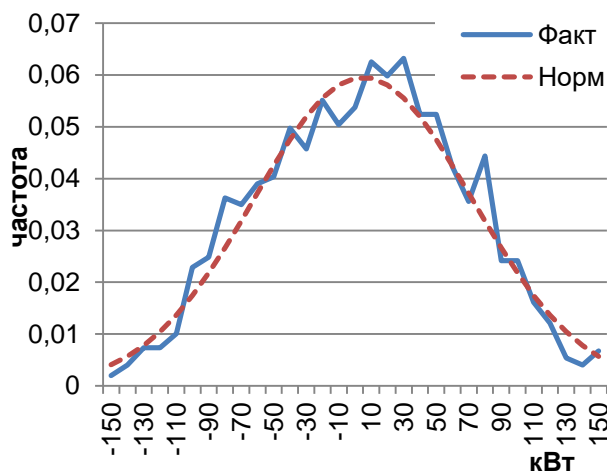


Рисунок 9 - Розподіл небалансів потужності за наявності ВДЕ

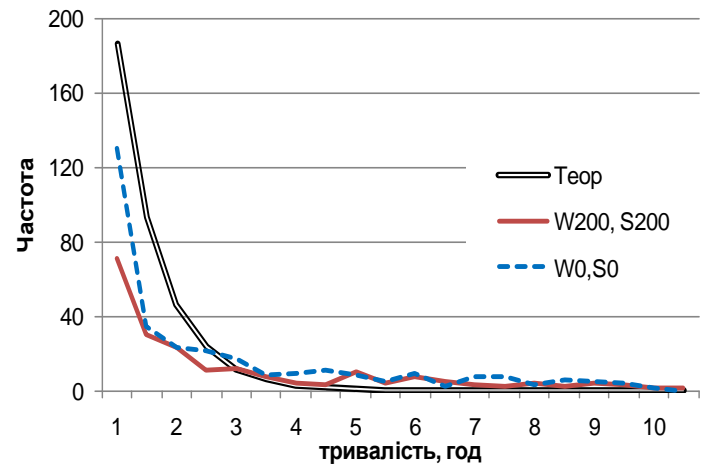


Рисунок 10 - Приклади тривалості значень небалансу потужності одного знаку

З метою підвищення енергетичної ефективності, а саме, максимально повного використання встановленої потужності ВДЕ, розглянуто оптимальне комбінування ВЕС та СЕС за умови мінімізації неконтрольованого розкиду значень генерованої потужності при максимізації виробленої енергії.

Спочатку розглянуто сумісну роботу вітрової та сонячної станцій незалежно від способу споживання їх енергії (умовно на необмеженого споживача). Для моделювання використано фактичні погодні дані (розд. 2-3). Враховано нормовані показники потужності ВЕС та СЕС, позначено:  $w$  – відносна частка номінальної потужності ВЕС, а  $s$  – відповідно СЕС, при цьому  $w+s=1$ . Сезонні осереднені показники генерованої потужності ( $P_c$ ) та СКВ сумарної генерації ВЕС та СЕС при різних варіантах їх комбінування наведено в табл. 8. При врахуванні лише денного часу зростає вага сонячної генерації, проте розмах відхилень поточної потужності відносно середнього практично не змінюється. Графічно результати табл. 8 зображені на рис. 11. Крім потужності та відхилень зображено коефіцієнт варіації:  $C_v = \frac{СКВ}{P_c}$ .

Таблиця 8

Показники генерованої потужності ВДЕ (в.о.)

Місяць	Параметр	w				
		1	0,75	0,5	0,25	0
Січень	$P_c$	0,41	0,32	0,24	0,16	0,07
	СКВ	0,33	0,24	0,17	0,13	0,16
Липень	$P_c$	0,28	0,27	0,26	0,24	0,23
	СКВ	0,27	0,21	0,19	0,22	0,29
За рік	$P_c$	0,425	0,358	0,293	0,223	0,153
	СКВ	0,333	0,25	0,193	0,185	0,233

При врахуванні повної доби мінімальне СКВ середньорічних значень досягається при частці ВЕС на рівні 0,32 загальної потужності ВДЕ, а мінімум коефіцієнта варіації  $C_v$  відповідає частці  $w=0,56$ . Якщо враховувати лише робочі години (8.00-18.00), то мінімум по  $C_v$  – 0,38 (вища потужність СЕС). У липні відповідні частки  $w$ : 0,52 та 0,58.

Розглянемо сумісні коливання рівнів генерування електричної енергії від ВДЕ та її споживання різними споживачами. Їх баланс визначає потребу в компенсуючих потужностях (резерві чи акумулюванні). ВДЕ з їх випадковим графіком генерації впливає на загальну варіативність потреб у традиційному постачанні енергії (т.зв. «чисте» навантаження – net base load).

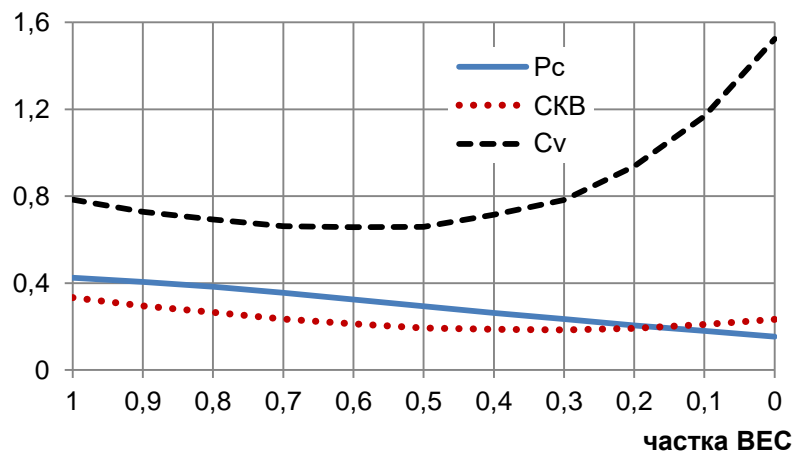


Рисунок 11 - Середньорічні показники для повної доби (в.о.)

Формула побудови місячного набору даних про баланс генерації та споживання, відповідно до припущення про плановий графік, має вигляд:

$$p_{ij} = (a_{ij} - a_i) - [(w_{ij} - w_i) + (s_{sj} - s_i)], \quad (21)$$

де  $p_{ij}$  – поточні відхилення від графіка навантаження;  $a_x$  – рівень споживання електроенергії;  $w_x$  та  $s_x$  – потужність ВЕС та СЕС відповідно;  $i$  – індекс часу (в даних прикладах крок 30 хв.);  $j$  – номер доби. Тут показники з одним індексом – осереднені на певну годину дня (добовий хід), зокрема  $a_i$  має відповідати плановому графіку споживання. Тоді  $p_i = a_i - w_i - s_i$  відповідає плановому «чистому» навантаженню.

Номінальна потужність ВДЕ та варіативність навантаження виступають критеріями оптимізації, коли необхідно максимізувати частку відновлюваної енергії при мінімумі відхилень від графіка споживання.

Перехід від номінальної до середньої робочої (ефективної) потужності можливий введенням коефіцієнта використання встановленої потужності ( $K_{ввп}$ ). Так, якщо сумарна номінальна потужність ВДЕ рівна  $R$ , а ефективна –  $r$ , то:

$$r = R(k_w w + k_s s) = R[k_w w + k_s (1 - w)], \quad (22)$$

де  $k_x$  –  $K_{ввп}$  відповідного ВДЕ, притаманний досліджуваному регіону та порі року.

Тоді розв'язками задачі оптимізації будуть  $\operatorname{argmax}_{R,w} r$  та  $\operatorname{argmin}_{R,w} D\{p_{i,j}\}$  (двокритеріальна задача) при умові виконання відповідних обмежень. Пріоритетність критеріїв визначається вимогами до енергосистеми. Як комбінований одиничний критерій може виступати коефіцієнт варіації  $C_v = \sigma/r$  як відношення СКВ до математичного очікування; його мінімум є результатом як зростання ефективної потужності ВДЕ, так і зменшення варіативності.

У розглянутих нижче прикладах прийнято, що середня потужність споживання (тобто регульована генерація) зменшується на ефективну потужність ВДЕ. Відхилення від графіка становлять небаланс потужності; розподіл небалансу як випадкової величини вважається нормальним. При зростанні частки потужності ВДЕ в загальній генерації СКВ зростає прискорено, а відносні показники (коефіцієнт варіації) – сповільнено (рис. 12).

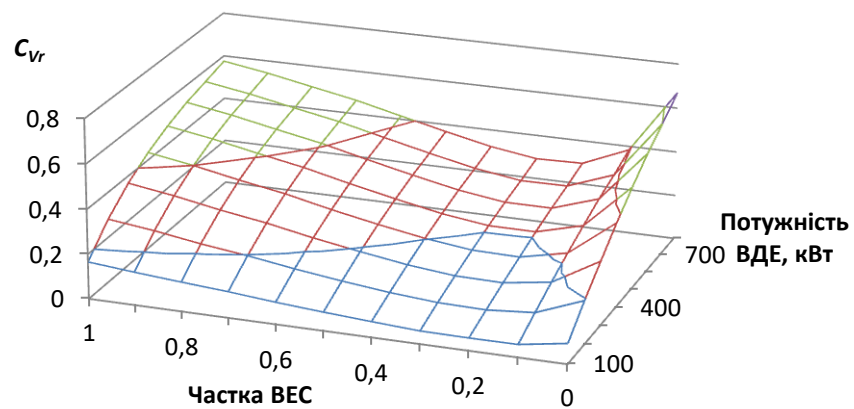


Рисунок 12 - Залежність додаткової варіативності  $C_{vr}$  від частки ВЕС та сумарної потужності ВДЕ

Для зимових даних коефіцієнт варіації мінімальна при частці ВЕС в межах від 0,2 до 0,3. Характер залежностей влітку аналогічний зимовому, проте помітно зростання потужності СЕС. Оптимальна частка ВЕС на рівні 0,15-0,2. Жовтень у досліджуваному році мав деяку відмінність від інших місяців: при малих потужностях ВДЕ сумарний СКВ навіть трохи зменшувався (рис. 13), оптимальна частка ВЕС становила 0,4.

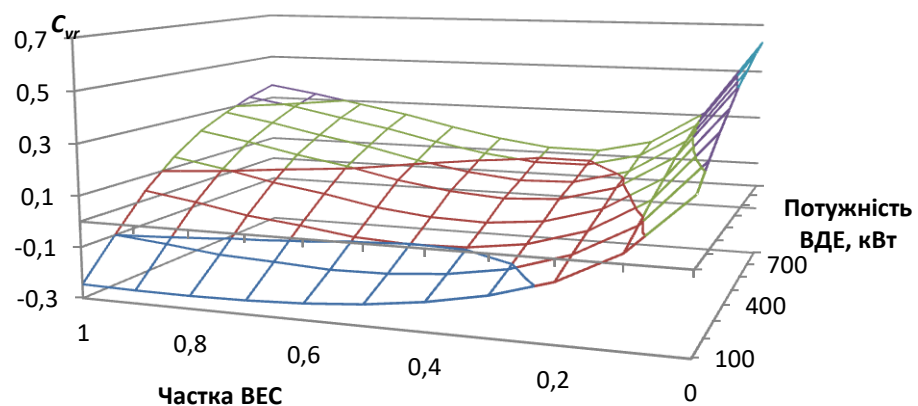


Рисунок 13 - Характер додаткової варіативності для населеного пункту у жовтні

При зростанні ВДЕ точка мінімуму СКВ зміщувалася до  $w=0,2$ . Залежності показників мінливості для групи н.п. мають вигляд, аналогічний споживачам меншої потужності (окремим н.п.), відносні показники мають близькі значення (максимум  $C_{vr}$  на рівні 0,6-0,7 при досягненні ВДЕ потужностей, рівних споживанню). Якщо як критерій обрано мінімізацію варіативності енергосистеми при впровадженні ВДЕ, то оптимальним рішенням буде певна пропорція вітрової та сонячної складової. Як обмеження може бути вимога не перевищити певний рівень дисперсії.

Можливе обмеження не по дисперсії (чи СКВ), а по абсолютних значеннях випадкових відхилень (флуктуацій) від графіка навантаження. Воно може виконуватися з певною вірогідністю. На практиці такі відхилення обмежені; в розглянутих вище прикладах для типових споживачів розмах відхилень не перевищував  $2,5\sigma$ . У межах цього діапазону розподіл можна вважати нормальним. Тоді обмеження за абсолютною величиною відхилень ( $p_{ij} \leq p_0$ ) можна перевести в обмеження за величиною СКВ:

$$\sigma_{\max} = \arg\{\Phi(P_0/\sigma) = \gamma\}, \quad (23)$$

де  $\Phi$  – інтеграл імовірності;  $\gamma$  – довірча імовірність.

На графіку СКВ це обмеження матиме вигляд кривої в горизонтальній площині (рис. 12, 13), область під проекцією якої на координатну площину ( $w, R$ ) містить допустимі розв'язки.

Нехай рівняння цієї проекції:  $R=\varphi(w)$ , тоді оптимальним рішенням буде  $w_0 = \arg\{r'(w) = 0\}$ , або розв'язок рівняння:

$$r'(w) = \varphi'(w)[(k_w - k_s)w + k_s] + \varphi(w)(k_w - k_s) = 0. \quad (24)$$

У такій постановці задача оптимізації стає детермінованою. Приклад графіків обмежень зображено на рис. 14.

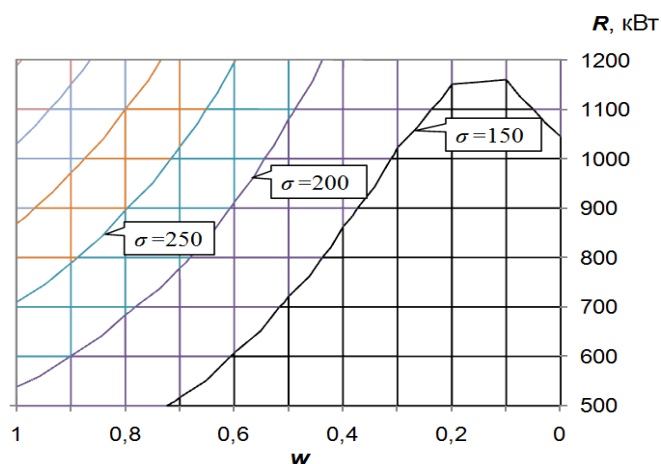


Рисунок 14 - Графіки  $R=\varphi(w)$  при різних значеннях допустимого СКВ

Для енергосистеми вищого рівня (в даному випадку ДнЕС) розрахунок оптимальних параметрів виконано імітаційним моделюванням, за результатами понад 1000 реалізацій стохастичного процесу. Результати, отримані різними методами, досить близькі. Математична модель навантаження в залежності від часу, як випадковий процес, бралась у вигляді (9).

Параметри зносу  $\beta$  та волатильності  $\sigma^*$  не є постійними для даного процесу, проте їх поведінка в реальних прикладах не вказує на явну залежність від часу, що дозволило прийняти гіпотезу стаціонарності.

**Шостий розділ «Розрахунки потреб акумулювання та резервування енергії в електротехнічних системах з комбінованою генерацією»** стосується потреб у резервуванні та акумулюванні енергії в комплексних системах з ВДЕ. Небаланс енергії як інтегральна характеристика небалансу потужності залежить від тривалості та знаку відхилень генерації від споживання. Графік накопичених (умовно) обсягів надлишкової та недостатньої енергії дозволяє зробити висновки щодо потреб у акумулюванні енергії. При оптимізації за критерієм математичного сподівання доцільно виходити з середнього рівня можливого накопичення, за критерієм надійності – з характеру розподілу кумулятивних показників небалансу енергії.

Розглянемо процес, що описує поточні відхилення від середнього значення, як дискретну модель блукання, в якому поточні значення знаходяться в певному коридорі відносно середнього. В узагальненому вигляді такий процес  $U(t)$  може бути описано виразом:

$$u_i = \alpha u_{i-1} + \eta \varepsilon_i, \quad \text{де } u_i = \int_{t_i}^{t_i+\Delta t} U(t) dt. \quad (25)$$

Тут неперервний процес представлено дискретним як послідовність осереднених на елементарному часовому проміжку значень. Він має властивості процесу Орнштейна-Уленбека (9), де позначено  $\alpha = e^{-\beta \cdot \Delta t}$ ;  $\eta = \frac{\sigma}{\sqrt{2\beta}} \sqrt{1 - e^{-2\beta \cdot \Delta t}}$ . Для масиву кумулятивних небалансів потужності отримаємо:

$$V_k = \sum_{i=0}^k U(t_i) = U(t_0) \frac{1 - \alpha^{k+1}}{1 - \alpha} + \eta \sum_{i=1}^k \varepsilon_i \frac{1 - \alpha^i}{1 - \alpha}. \quad (26)$$

При наявності прогнозування середньодобових значень споживання, тобто при врахуванні лише поточних відхилень, досяжний кумулятивний небаланс потужностей (осереднених за час  $\Delta t$ ) при умові  $\alpha < 1$  матиме наступну оцінку дисперсії:

$$D_P\{V_k\} = \frac{\sigma_0^2}{(1 - \alpha)^2} + \frac{\eta^2}{2(1 - \alpha^2)} \left( n - \frac{2\alpha}{1 - \alpha} + \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} \right), \quad (27)$$

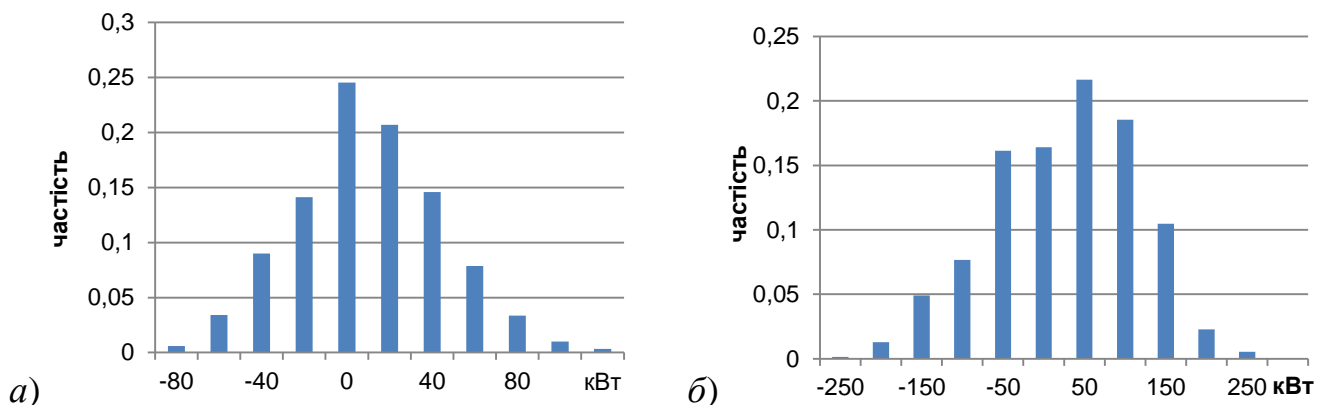
де  $\sigma_0$  – СКВ відхилень потужностей як імовірний розкид початкового значення в момент  $t_0$  (його математичне очікування рівне нулю).

Дисперсія небалансу енергії додатково враховує інтервал часу  $\Delta t$ .

Оскільки вигляд формули (25) відповідає моделі авторегресії з одним параметром, можна застосувати відповідну стандартну процедуру розрахунку, де  $\alpha$  буде параметром авторегресії, а  $\eta$  – СКВ похибок. У загальному випадку для визначення СКВ кумулятивного небалансу енергії  $\sigma_K$  можна записати формулу дисперсії можливого небалансу у вигляді:

$$\left(\frac{\sigma_K}{\Delta t}\right)^2 = \left(\frac{1-\alpha^{n+1}}{1-\alpha}\right)^2 \sigma_0^2 + \frac{\eta^2}{2(1-\alpha^2)} \left(n+1 - 2\frac{1-\alpha^{n+1}}{1-\alpha} + \frac{1-\alpha^{2(n+1)}}{1-\alpha^2}\right). \quad (28)$$

Знання фактичних статистичних показників розкиду  $\sigma_0$  та  $\sigma_K$  дозволяє розрахувати параметри  $\alpha$ ,  $\eta$  математичної моделі (25). Однак величина  $\sigma_K$  сама є предметом пошуку при оцінці незбалансованості енергосистеми. Тоді додатковою умовою може бути процедура пошуку параметра авторегресії часового ряду. Інший шлях – використання СКВ стрибків потужності за одиницю часу (див. розд. 2), як параметра волатильності. Приклади розподілів імовірності накопичення та подальшого використання надлишкової енергії одиночним н.п. зображено на рис. 15.



а) - при щоденному прогнозуванні; б) - та без прогнозу

Рисунок 15 - Розподіл небалансу потужності

Очевидно, середні рівні небалансу енергії для різних днів можуть мати різні знаки, залежно від послідовності значень небалансу потужності. Приклад послідовності середньодобових небалансів для н.п. зображено на рис.16.

Наявність щоденного прогнозування приводить до добової циклічності накопичення енергії. Середнє значення небалансу потужності рівне нулю, тоді як для кумулятивного небалансу середньодобове значення – це випадкова величина (див. рис. 16), хоча місячний набір даних відповідає нормальному розподілу з нульовим середнім.

За відсутності поточного прогнозування організація енергосистеми базується на багаторічних статистичних даних, приведених до місячних показників. Отже, плановий графік споживання має відповідати середнім місячним значенням, відповідно отримаємо місячну циклічність небалансів



потужності та енергії. Розподіл небалансів енергії в такому випадку несиметричний, відмінний від нормального і скоріше нагадує «білий шум».

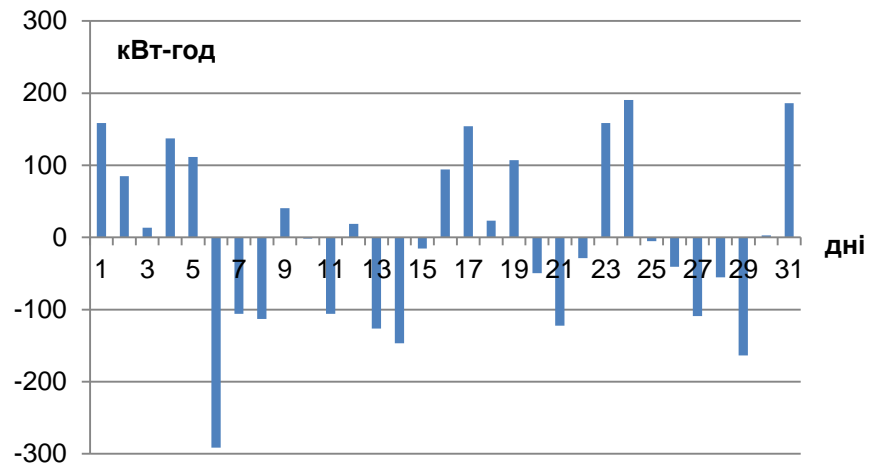


Рисунок 16 - Середньодобові небаланси енергії (добова циклічність)

При складанні випадкових процесів як набору випадкових величин дисперсія суми визначається формулою:  $\sigma_{X-Y}^2 = \sigma_X^2 + \sigma_Y^2 - 2\rho_{xy}\sigma_X\sigma_Y$ , де  $\rho_{xy}$  – кореляція процесів (розглядається як кореляція синхронних наборів даних).

Тоді дисперсія навантаження (21) з урахуванням ВДЕ визначається як сума складових:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = D(p_{ij}) = D(a_{ij}) + D(w_{ij}) + D(s_{ij}) + 2[\text{cov}(a, w) + \text{cov}(a, s) + \text{cov}(w, s)]. \quad (29)$$

У розглянутих прикладах певна кореляція (загалом незначна) спостерігалася для середніх значень потужності, півгодинні флуктуації практично незалежні.

За умови повного збереження тимчасових надлишків енергії потрібна досить велика номінальна потужність та ємність акумулювання, враховуючи наявність окремих екстремальних значень. Оскільки імовірність таких значень мала (рис. 17), доцільним видається застосування довірчих інтервалів при заданій імовірності чи використання заданих порогових значень.

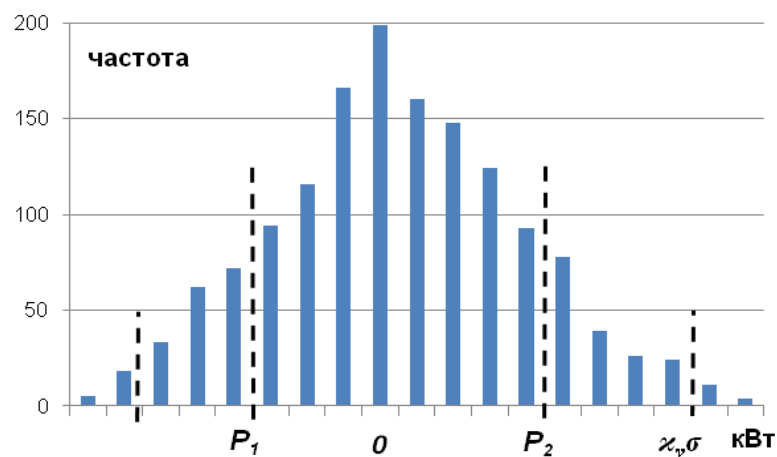


Рисунок 17 - Гістограма місячних даних про небаланс потужності

Знаючи функцію щільності розподілу для небалансу потужності  $f(p)$ , можна розрахувати обсяг акумульованої енергії при різних порогових значеннях:

$$\int_{-\infty}^{P_1} p f(p) dp = E_1/T, \quad \int_{P_2}^{\infty} p f(p) dp = E_2/T. \quad (30)$$

Як приклад для одного н.п. традиційне споживання має параметри:  $\sigma_0=35$  кВт,  $\sigma_K=152$  кВт-год (місяць січень), прогнозування щоденне. Для довірчої імовірності  $\gamma=0,9$  при нормальному розподілі маємо квантілі  $|k|_{0,9} = \kappa_{0,95}=1,64$ . Отже, гарантоване з імовірністю не нижче 90% збереження надлишкової енергії для забезпечення нульового балансу потужності потребує ефективної ємності акумулювання 250 кВт-год та потужності 57 кВт.

При наявності ВДЕ, наприклад, при  $R=400$  кВт та  $w=0,5$ , матимемо  $\sigma_\Sigma=55$  кВт,  $\sigma_K=244$  кВт-год. Тоді за тої ж довірчої імовірності  $\gamma=0,9$  матимемо потребу в ефективній ємності акумулювання 400 кВт-год та потужності 90 кВт. Отже, додаткова потреба в потужності акумулювання складе 33 кВт, або 8% від потужності ВДЕ.

Проблема зберігання енергії в енергосистемах зі значним рівнем відновлюваної енергетики є предметом багатьох досліджень, а розробка гібридних систем зберігання енергії, або HESS (hybrid energy storage systems), відноситься до найбільш інноваційної галузі.

Головною економічною умовою при побудові локальної енергосистеми виступає, як правило, мінімізація собівартості електроенергії. Однак у випадку застосування ВДЕ важливим є також досягнення певних показників надійності, що забезпечується системами акумулювання енергії. Невизначеність, пов'язана з залежністю від погодних умов, може спричинити ризики ненадійного енергозабезпечення, що в свою чергу призведе до невизначеності експлуатаційних витрат. Ризик може бути оцінений у числовому вигляді. При статистичному аналізі ризик часто вимірюється за допомогою стандартної характеристики, як дисперсія чи СКВ небалансу енергії. Тоді критеріями оптимізації собівартості будуть умови з формул (15), (29):

$$f(T) = \int_0^T \sum_i^N c_i y_i(t) dt \rightarrow \min, \quad \sigma_\Sigma^2 = D(p_{ij}) \rightarrow \min. \quad (31)$$

Якщо говорити про двокритеріальну оптимальність конфігурації ЛЕС, то собівартість отриманої з ВДЕ електроенергії має порівнюватися з альтернативним безризиковим джерелом (електромережею для комбінованих систем чи керованим джерелом типу дизель-генератора в автономних системах) відповідно до математичної моделі Дж.Тобіна. Арбітражною кривою оптимізації буде обвідна області значень стану ЛЕС з різнотипними ВДЕ (аналог кривої ризику-доходу Марковіца). Якщо в складі показника собівартості враховувати наявність акумулюючих пристроїв (АКБ), то собівартість зростатиме пропорційно

потужності ВДЕ, а варіативність (і ризик) зменшуватиметься обернено пропорційно до потужності акумуляторів.

Приклад побудови множини станів ЛЕС за координатами собівартості енергії ( $C_e$ ) та коефіцієнта варіації потужності ( $C_v$ ) для одиночного н.п. з урахуванням собівартості енергії ВЕС та СЕС зображено на рис. 18. За експертними оцінками вартості ВДЕ прийнято: для ВЕС 1200 €/кВт, для СЕС 700 €/кВт, для АКБ (вартість за ємністю) приблизно 200 €/кВт-год.

Обвідна множини станів на рис. 18 характеризує найкращі варіанти роботи ЛЕС, по суті їх граничні значення.

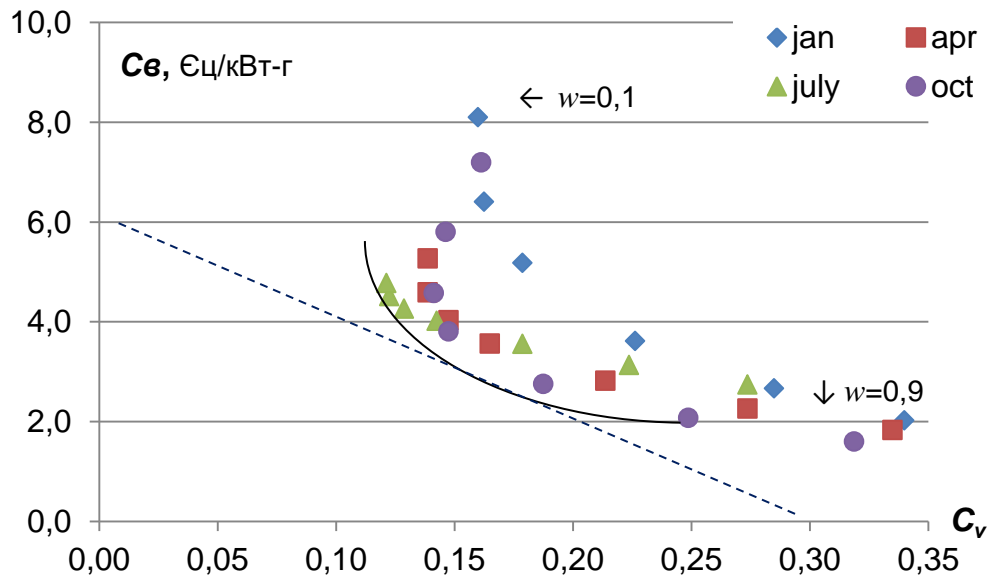


Рисунок 18 - Множина значень ризику-доходу для різних станів ЛЕС

Помітно, що більшість станів має близькі значення. Отже, нижню обвідну можна вважати лінією оптимальних значень. Відповідно до методу Дж.Тобіна точкою оптимуму має бути пропорція  $w=0,8$  з показниками  $C_e=2,5$  €/кВт·год,  $C_v=0,17$ . Мова йде про собівартість електроенергії, отриманої від ВДЕ, а варіативність стосується загального балансу споживання.

Поведінка показника вартості обладнання схожа на аналогічні графіки стосовно варіативності ВДЕ (розд. 5), оскільки потреба в акумуляторах зростає зі збільшенням неконтрольованих коливань потужності; іншим фактором є зростання вимог до надійності енергозабезпечення. Зокрема, в наведеному прикладі для регіональної енергосистеми потреба в ємності акумуляторів становила 10-15% від добової продуктивності ВДЕ, при забезпеченні високого рівня надійності (понад 95% гарантованого забезпечення).

Дані співвідношення можуть різнитися для різних режимів поживання, пір року, типу обладнання. При цьому враховується можливість завчасного передбачення рівнів споживання та генерації і надійність роботи традиційних (керованих) джерел енергії.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішена важлива науково-прикладна проблема розробки 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. Отримано наступні результати:

1. Встановлено фактори, які впливають на якість електропостачання електротехнічних систем з комбінованою генерацією, а саме: статистичні параметри випадкового процесу генерації ВДЕ, що описують стан енергобалансу, визначають темп змін, їх розмах, щільності розподілу випадкових значень, довірчі інтервали допустимих параметрів.

2. Виявлено поведінку метеофакторів, притаманних досліджуваному регіону (приморським областям на півдні України), та відповідної потужності ВЕС і СЕС як випадкових величин, визначено закони розподілу їх імовірності з урахуванням сезонних змін з використанням багаторічних даних метеорологічних спостережень з різною часовою дискретністю. Зокрема, досліджено імовірний розкид значень небалансу для різних конфігурацій ВСЕС протягом денного часу. Так за довірчої ймовірності 0,95 зменшується розкид небалансу (відхилення від середнього) на 16% для однотипних генерацій (тільки ВЕС або СЕС), та на 20% для змішаної генерації. По показнику коефіцієнта варіації майже для всіх розглянутих варіантів коефіцієнт варіації небалансів сумісної генерації нижчий, ніж однотипної.

3. Розроблена і досліджена узагальнена математична модель процесів генерування та споживання електроенергії в енергосистемах з потужними ВЕС та СЕС, яка містить формалізацію випадкових чинників, а саме: флуктуацій потужності, спричинених погодними факторами та нерівномірним режимом споживання, що забезпечує розробленій моделі високий рівень точності і адекватності. Середні похибки при порівнянні результатів моделювання з експериментальними даними становили 1-3%.

4. Встановлено поведінку параметрів, що характеризують споживання електроенергії різними споживачами, в тому числі малими підприємствами, окремими населеними пунктами, групами населених пунктів, регіональною енергосистемою в цілому на основі статистичної обробки фактичних багаторічних даних. Досліджено закони розподілу імовірності та побудовано функції щільності розподілу, що описують випадкову складову навантаження на електроенергетичну систему, завдяки чому формалізовано задачу розрахунку поточного балансу потужностей. Достовірність отриманих результатів підтверджується співставленням даних математичного моделювання та фактичних даних спостереження.

5. Встановлено, що існує відмінність в оптимальних співвідношеннях потужностей ВЕС та СЕС для цілодобових процесів споживання та лише для робочих годин, оскільки аналогічним чином зростає роль сонячної генерації. При цьому мінімальна відносна варіативність власне ВДЕ (без урахування варіативності споживання) спостерігається за приблизно паритетними встановленими потужностями сонячної та вітрової генерації. Зокрема, при

врахуванні повної доби мінімальне середньоквадратичне відхилення середньорічних значень досягається при частці ВЕС на рівні 0,32 загальної потужності ВДЕ, а мінімум коефіцієнта варіації відповідає частці ВЕС 0,56.

6. Встановлено критерії, що визначають збалансованість енергосистеми з розосередженою генерацією на основі ВДЕ мінливої природи (вітрової та сонячної), та досліджено фактори, які спричинені наявністю ВДЕ і врахуванням випадкової природи генерації, зокрема встановлено оптимальні співвідношення різних джерел енергії при варіюванні обсягів впровадження відновлюваної енергії. Так, при значному впровадженні ВДЕ (до половини споживаної потужності) імовірність небалансу понад 10% споживання становить 0,10-0,12.

7. Розв'язано багатокритеріальну оптимізаційну задачу формування структури генерації електроенергії, зокрема побудовано різні варіанти цільових функцій та системи обмежень відповідно до вимог, що задаються до електротехнічних систем з комбінованою генерацією, та запропоновано шляхи знаходження оптимальних розв'язків з урахуванням собівартості електроенергії та рівня ризиків енергозабезпечення. Зокрема встановлено, що для зимових місяців відносні показники небалансу потужності мінімальні при частці ВЕС в межах 0,2-0,3; влітку внаслідок зростання ролі СЕС оптимальна частка ВЕС знаходиться на рівні 0,15-0,2.

8. Розроблено методи розрахунку показників якості постачання електричної енергії та їх довірчих інтервалів для електротехнічних систем з високим рівнем впровадження вітро-сонячної генерації, на підставі яких розроблено алгоритми розрахунків щодо використання систем резервування та акумуляування енергії в комплексі з ВДЕ для забезпечення визначеної якості енергопостачання. Так, для даних січня область, для якої середньоквадратичне відхилення небалансу в окремому населеному пункті не перевищує 150 кВт, обмежена кривою з максимумом сумарної встановленої потужності ВСЕС 1150 кВт при частці ВЕС 0,12. Максимум ефективної потужності ВДЕ досягається при частці ВЕС 0,2-0,4; абсолютне значення залежить від коефіцієнта використання встановленої потужності сонячної та вітрової генерації і знаходиться на рівні 155-160 кВт для існуючих типів електроустановок.

9. Виконано практичні розрахунки для конкретних прикладів споживання, які вказують на можливість забезпечення заданих вимог щодо якості енергопостачання з використанням порівняно невеликих потужностей системи резервування та акумуляування енергії, ємність якої не перевищує 10-15% добової продуктивності ВДЕ у складі вітро-сонячних станцій.

10. Отримані результати дозволяють забезпечити високу енергетичну ефективність використання відновлюваної генерації за рахунок збалансованої генерації та споживання; при оптимізації потужностей різних типів ВДЕ практично удвічі може бути знижений рівень незбалансованої потужності, що є технічним ефектом використання результатів роботи. Економічний ефект використання результатів роботи забезпечується за рахунок оптимізації вибору обладнання та дає змогу знизити рівень капітальних витрат на 25-35% при тій же надійності. Зокрема узгоджений за надійністю вибір акумуляторів дозволяє зменшити їх ємність у 7-10 разів порівняно з вимогою резервувати повну добу

продуктивність ВДЕ. Так, для розглянутого прикладу – Дніпровської енергосистеми – впровадження 2 ГВт потужностей ВДЕ завдяки пропонуваній оптимізації можна заощадити 700-900 млн.€ капіталовкладень, при прийнятих значеннях вартості.

Рекомендації за результатами роботи використані Інститутом відновлюваної енергетики НАН України, у Запорізькій обласній державній адміністрації, Мелітопольській районній раді, Мелітопольських високовольтних електромережах ПАТ «Запоріжжяобленерго» та кафедрою відновлюваних джерел енергії факультету електроенерготехніки та автоматики Національно технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Дідур В. А. Сучасна енергетика: стан, проблеми, перспективи розвитку / В. А. Дідур, О. В. Лисенко, С. В. Адамова // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ. - Мелітополь, 2016. - Вип. 16, т. 2 : Технічні науки. - С. 113-120. *(Здобувачкою узагальнено сучасні дослідження в частині ефективності проектних рішень в електротехнічних систем з комбінованою генерацією на базі відновлюваних джерел енергії, висновки та рекомендації)*

2. Кузнецов М. П. Можливості короткотермінового прогнозування сонячної енергії / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко // Відновлювана енергетика. – 2017. – № 1 (48). – С. 25-32. *(Здобувачкою узагальнено сучасні дослідження в частині нових підходів до роботи енергосистеми, адаптованих до наявності мінливих поновлюваних джерел, висновки та рекомендації)*

3. Кузнецов М. П. Оцінка градієнтів генеруючої потужності вітроенергетичних установок [Електронний ресурс] / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; відп. за вип. І. П. Назаренко. - Мелітополь, 2017. - Вип. 7, т. 1. - С. 3-10. – Режим доступу : <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf7t1/3.pdf>. *(Здобувачкою виконано оцінку поточної мінливості потужності вітрового потоку та її вплив на характер постачання електроенергії при роботі у складі централізованої чи локальної електротехнічної системи)*

4. Кузнецов М. П. Оцінка характеристик вітрового режиму Півдня України для потреб вітроенергетики / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України / НУБіП ; відп. ред. С. М. Ніколаєнко. - К., 2017. - Вип. 261. - С. 195-202. - (Техніка та енергетика АПК). *(Здобувачкою виконано формування задачі дослідження, збір, агрегування та статистична обробка початкових даних вітрового режиму із застосуванням графічних засобів відображення, висновки та рекомендації)*

5. Лисенко О. В. Статистичний аналіз потенціалу спільної роботи вітрової та сонячної електростанцій / О. В. Лисенко, І. П. Назаренко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка: наук. фах. видання / ХНТУСГ ім. Петра Василенка. - Харків, 2017. - Вип. 186 : Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. - С. 21-22. *(Здобувачкою виконано агрегування та статистична обробка початкових даних щодо спільної роботи вітрової та сонячної електростанцій із застосуванням графічних засобів відображення, висновки та рекомендації)*

6. Кузнецов М. П. Імовірнісне моделювання потужності електроенергетичного комплексу у складі вітрової та сонячної електростанцій / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. - 2018. - № 50. - С. 37-42. *(Здобувачкою виконано статистичний аналіз вітрової та сонячної енергії, проведено перевірку адекватності моделі сумісної роботи сонячної та вітрової електростанцій, висновки та рекомендації)*

7. Кузнецов М. П. Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко, О. А. Мельник // Відновлювана енергетика. - 2018. - № 2 (53). - С. 6-16. *(Здобувачкою проаналізовано сучасні підходи в частині вирішення задач оптимізації та запропоновані відповідні рекомендації що до їх застосування)*

8. Кузнецов М. П. Оцінка балансу потужності комбінованих енергосистем / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко // Відновлювана енергетика. - 2018. - № 4. - С. 6-14. *(Здобувачкою досліджена надійність енергозабезпечення при різних сценаріях впровадження ВДЕ, визначена потреба в резервуванні потужностей та виконані розрахунки рівнів небалансу потужності комбінованих енергосистем)*

9. Лисенко О. В. Аналіз можливості використання відновлюваних джерел енергії для підвищення якості електропостачання в сільськогосподарському виробництві [Електронний ресурс] / О. В. Лисенко // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : електрон. наукове фах. видання / ТДАТУ. - Мелітополь, 2018. - Вип. 8, т. 2. - С. 1-9. - Режим доступу : <http://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/31/27>.

10. Лисенко О. В. Аналіз світового досвіду використання відновлюваних джерел енергії / О. В. Лисенко, С. В. Адамова // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ. - Мелітополь, 2018. - Вип. 18, т. 1 : Технічні науки. - С. 326-333. *(Здобувачкою визначені перспективні шляхи використання відновлюваних джерел енергії та обрано напрям подальшого дослідження)*

11. Лисенко О. В. Дослідження стаціонарності процесів споживання електричної енергії в електричних мережах / О. В. Лисенко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2018. - № 28 (104). - С. 134-141.

12. Лисенко О. В. Оцінка випадкових властивостей споживання електроенергії / О. В. Лисенко // Відновлювана енергетика. - 2018. - № 1(52). - С. 26-36.

13. Лисенко О. В. Розрахунок параметрів математичної моделі споживання електричної енергії [Електронний ресурс] / О. В. Лисенко // Науковий вісник

Таврійського державного агротехнологічного університету : електрон. наукове фах. видання / ТДАТУ . - Мелітополь, 2018. - Вип. 8, т. 2. – С. 1-11. Режим доступу : <http://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/30/28>.

14. Кузнецов М. П. До оптимального комбінування вітрових та сонячних електростанцій / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко, О. А. Мельник // Відновлювана енергетика : наук.-приклад. журнал / Ін-т відновлюваної енергетики НАН України. - Київ, 2019. - № 1. - С. 10-19. *(Здобувачкою виконані розрахунки оптимального співвідношення різних джерел відновлюваної енергії в гібридних енергосистемах та встановлена наявність оптимальних співвідношень потужності ВЕС та СЕС, при яких мінімізується загальна варіативність енергобалансу)*

15. Лисенко О. В. Оцінка показників комбінованої локальної енергосистеми з накопиченням енергії / О. В. Лисенко, О. А. Мельник, Д. М. Нестерчук // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка: наук. фах. видання / ХНТУСГ ім. Петра Василенка. - Харків, 2019. - Вип. 203 : Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. - С. 34-38. *(Здобувачкою виконані розрахунки показників комбінованої локальної енергосистеми з накопиченням енергії та їх перевірка шляхом аналізу статистичних даних)*

16. Лисенко О. В. Постановка задачі оптимізації для комбінованої енергосистеми / О. В. Лисенко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ. - Мелітополь, 2019. - Вип. 19, т. 2 : Технічні науки. - С. 208-215.

17. Кузнецов М.П. Задачі оптимізації комбінованих енергосистем за економічними критеріями / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко, О. А. Мельник // Відновлювана енергетика : наук.-приклад. журнал / Ін-т відновлюваної енергетики НАН України. - Київ, 2019. - № 4. - С. 10-19 *(Здобувачкою виконані розрахунки для вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації локальної енергосистеми з відновлюваними джерелами енергії та визначено оптимальне рішення поточного стану енергосистеми з різнотипними ВДЕ та системою акумулювання)*

18. Кузнецов М.П. Характер балансування потужності в локальній енергосистемі з відновлюваними джерелами енергії [Електронний ресурс] / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2019. – Вип. 9, т. 1- С. 1-11. – Режим доступу : <http://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/178/166> *(Здобувачкою запропоновано вирішення задачі комплексного забезпечення електричною енергією з використанням мінливих за природою відновлюваних джерел енергії)*

19. Кузнецов Н. П. Вероятностные аспекты использования возобновляемых источников энергии на пустыющих и непригодных для сельского хозяйства территориях / Н. П. Кузнецов, О. В. Лысенко // World science : international Scientific and Practical Conference (Ajman - United Arab Emirates, July 2017). - Ajman - United Arab Emirates, 2017. – № 7(23), vol. 2. - С. 45-51. **(Index**



**Copernicus)** *(Здобувачкою проведений аналіз проблем інтеграції ВДЕ до енергосистеми)*

20. Кузнецов Н. П. Статистический анализ энергетических показателей солнечной радиации (на примере данных Токмакской солнечной электростанции) [Электронный ресурс] / Н. П. Кузнецов, О. В. Лысенко // Проблемы региональной энергетики / Институт энергетики АНМ. - Кишинёв, 2017. - № 2(34). - С. 139-147. – Режим доступа : [http://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronni\\_jurnal-234-2017](http://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronni_jurnal-234-2017). **(Web of Science)** *(Здобувачкою проведений розрахунок та статистичний аналіз даних сонячної радіації у досліджуваному регіоні)*

21. Лысенко О. В. Энергетическая оценка ветрового потенциала юга Украины / О. В. Лысенко // International academy journal Web of Scholar. – 2018. - № 3 (21), vol. 1. - С. 9 – 11. **(Index Copernicus)**

22. Оптимизация соотношения мощностей ветровых и солнечных электростанций [Электронный ресурс] / Н. П. Кузнецов [и др.] // Проблемы региональной энергетики / Институт энергетики АНМ. - Кишинёв, 2018. - № 3(38). - С. 127-140. – Режим доступа : [http://journal.ie.asm.md/assets/files/12\\_03\\_38\\_2018.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/12_03_38_2018.pdf). **(Web of Science)** *(Здобувачкою визначені критерії та виконаний розрахунок оптимального співвідношення різних ВДЕ для комбінованих електротехнічних систем)*

23. Кузнецов Н. П. Модель потребления электрической энергии для энергосистем Украины различного уровня локальности [Электронный ресурс] / Н. П. Кузнецов, О. В. Лысенко, А. Б. Чебанов // Проблемы региональной энергетики / Институт энергетики АНМ. - Кишинёв, 2019. - № 3(44). - С. 31-42. - Режим доступа : [https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag\\_file/03\\_03\\_44\\_2019.pdf](https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/03_03_44_2019.pdf). **(Web of Science)** *(Здобувачкою проведена оцінка впливу нестаціонарності параметрів математичної моделі на точність прогнозування енергетичного балансу в локальній електротехнічній системі)*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

24. Адамова С. В. Аналіз характеристик вітрового потенціалу Півдня України для потреб вітроенергетики за даними вимірів на Ботіївській ВЕС / С. В. Адамова, О. В. Лисенко // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування : матер. VI Міжнар. наук.-практ. конференції (м. Київ, 15-19 травня 2017 р.) / НУБіП. - К., 2017. - С. 38-41.

25. Кузнецов М. П. Статистичний аналіз енергетичних показників сонячної радіації за даними Токмакської СЕС Запорізької області / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті : матер. XVIII Міжнар. наук.-практ. конференції (м. Київ, 27 - 29 вересня 2017 р.) / НТУУ КПІ. - К., 2017. - С. 324 - 327.

26. Лисенко О. В. Статистичний аналіз сумарної дії вітрової та сонячної енергії / О. В. Лисенко // Topical Problems of Modern Science : Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference (November 18, 2017). - Warsaw, 2017. - Vol. 1. - С. 6-11.

27. Лисенко О. В. Аналіз спільної роботи вітрової та сонячної електростанцій / О. В. Лисенко // Цілі сталого розвитку третього тисячоліття:

виклики для університетів наук про життя : мат. Міжнар. конф. ( м. Київ, 23–25 травня 2018 р.) / НУБіП України ; відпов. за вип. В. В. Отченашко. - К., 2018. - Т. 5. - С. 54-56.

28. Лисенко О. В. Розрахунок параметрів математичної моделі споживання електричної енергії / О. В Лисенко // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті : матер. XIX Міжнар. наук.-практ. конференції (м. Київ, 26 - 28 вересня 2018 р.) / НТУУ КПІ. - К., 2018. - С. 103 - 106.

29. Лисенко О. В. Постановка задачі оптимізації для побудови комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії / О. В. Лисенко // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті : матер. XX ювілейної Міжнар. наук.-практ. конференції (м. Київ, 15 - 16 травня 2019 р.) / НТУУ КПІ. - К., 2019.

30. Лисенко О.В. Оцінка оптимальності побудови енергосистеми з використанням відновлюваних джерел енергії / О. В. Лисенко // Енергозабезпечення технологічних процесів : збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції пам'яті І. І. Мартиненка 13-14 червня 2019 року / Мелітополь. – 2019. – С. 63

31. Hybrid Power System Stochastic Optimization / O. V. Lysenko [и др.] // Modern Development Paths of Agricultural Production. Trends and Innovations : Conference proceedings / Tavria State Agrotechnological University. - [Б. м.], 2019. - Ч. 2. - С. 385-394. (Scopus)

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

32. Кузнецов Н. П. Анализ потенциала возобновляемых источников энергии на территориях непригодных для сельскохозяйственного производства / Н. П. Кузнецов, О. В Лысенко // Энергоефективність та енергозбереження: економічний, технічний та агроекологічний аспекти : колективна монографія / Кол. авторів; за заг. ред. П. М. Макаренка, О. В. Калініченка, В. І. Аранчій. - Полтава : ПП Астроя, 2019. - 603 с. (Здобувачкою проаналізовано можливість сумісної роботи ВДЕ та енергосистем різного рівня локальності)

## АНОТАЦІЯ

**Лисенко О. В. Наукові основи підвищення енергетичної ефективності та якості електропостачання в електротехнічних системах з комбінованою генерацією. – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Мелітополь, 2020.

У першому розділі виконано огляд стану та перспективи забезпечення споживачів електричною енергією в електротехнічних системах з комбінованою генерацією. Проаналізовано світовий досвід використання відновлюваних джерел енергії. Проведений огляд факторів впливу ВДЕ на роботу ЛЕС.

У другому розділі аналізуються метеодані, що характеризують роботу сонячних та вітрових електростанцій. Вихідні дані щодо вітроенергетики для

південного регіону України взято за даними вимірів на Ботіївській ВЕС. Сонячна радіація оцінена як за доступними даними, так і фактичними даними в районі Токмацької СЕС. Ці дані агреговані та представлені в параметричному вигляді.

У третьому розділі досліджено дані, що характеризують споживання електричної енергії в досліджуваному регіоні. Впровадження ВДЕ та їх інтегрування до енергосистем різних рівнів супроводжується потребами в додатковому узгодженні режимів генерування та споживання електроенергії. Для південного регіону (території Запорізької обл.) проведено дослідження для виявлення можливостей узгодження генерації ВДЕ зі споживанням, виконано аналогічні дослідження графіків навантаження (споживання). Аналіз випадкових складових графіків споживання електроенергії проведено на прикладі багаторічних даних для кількох населених пунктів та місцевих підприємств Мелітопольського району Запорізької області.

У четвертому розділі розглядається побудова критеріїв та системи обмежень, що визначають оптимальність функціонування вітро-сонячної генерації. Сформульовано проблеми відновлюваної енергетики, які потребують вирішення оптимізаційних задач. Зроблено загальний огляд методів оптимізації, підкреслено прийнятні підходи для вирішення поставлених задач. Зокрема, це побудова поверхні відгуку при імітаційному моделюванні, цілочисельні методи для модульних систем, числові методи.

У п'ятому розділі наводяться методологія та приклади розрахунку показників балансової надійності та їх довірчих інтервалів для ЛЕС. З метою підвищення енергетичної ефективності, а саме, максимально повного використання встановленої потужності ВДЕ, розглянуто оптимальне комбінування ВЕС та СЕС за умови мінімізації неконтрольованого розкиду значень генерованої потужності при максимізації виробленої енергії.

Шостий розділ стосується потреб у резервуванні та акумулюванні енергії в комплексних системах з ВДЕ. Небаланс енергії як інтегральна характеристика небалансу потужності залежить від тривалості та знаку відхилень генерації від споживання. Графік накопичених обсягів надлишкової та недостатньої енергії дозволяє зробити висновки щодо потреб в акумулюванні енергії.

**Ключові слова:** локальні електротехнічні системи, комбінована генерація, відновлювані джерела енергії, балансова надійність, якість електричної енергії, стохастична оптимізація, оптимальна структура локальних електротехнічних систем, резервування та акумулювання потужності.

## ABSTRACT

**Lysenko O.V. Scientific bases of increasing energy efficiency and quality of power supply in electrotechnical systems with combined generation. - Qualification work on the rights of the manuscript.**

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, 2020.

The first chapter reviews the state and prospects of providing consumers with electricity in electrotechnical systems with combined generation. International

experience of using renewable energy sources is analyzed. A review of the factors influencing renewable energy sources (RES) on the operation of local electric systems (LES) is made.

The second chapter analyzes meteorological data that characterize the operation of solar and wind power plants. The initial data on wind energy for the southern region of Ukraine are taken from measurements at the Botiyivska wind farm. Solar radiation is estimated both on the basis of available data and actual data in the area of Tokmak solar power plant (SPP). These data are aggregated and presented in parametric form.

The third chapter examines the data that characterize the consumption of electricity in the region of study. The introduction of RES and their integration into power systems of different levels is accompanied by the need for additional harmonization of the regimes of electricity generation and consumption. For the southern region (Zaporizhia oblast), a study was conducted to identify opportunities to match the generation of RES with consumption. Similar studies of load (consumption) schedules were performed. The analysis of random components of electricity consumption graphs was carried out on the example of long-term data for several settlements and local enterprises of Melitopol district of Zaporizhia oblast.

The fourth chapter considers the construction of criteria and the system of constraints that determine the optimal functioning of wind-solar generation. Problems of renewable energy, including optimization tasks, are formulated. The general review of optimization methods is made, with the emphasis on acceptable approaches for solving the set tasks. In particular, they are the construction of the response surface in simulation, integer methods for modular systems, numerical methods.

The fifth chapter provides the methodology and examples for calculating balance reliability indicators and their confidence intervals for LES. In order to increase energy efficiency, namely, the fullest use of the installed RES capacity, the optimal combination of wind farms and SPP is considered, provided that the uncontrolled scatter of the generated power values is minimized while maximizing the produced energy.

The sixth chapter deals with the needs for energy accumulation and storage in integrated RES systems. Energy imbalance as an integral characteristic of power imbalance depends on the duration and sign of deviations of energy generation from consumption. The schedule of accumulated amount of excess and insufficient energy allows us to draw conclusions about the needs for energy accumulation.

**Key words:** local electrotechnical systems, combined generation, renewable energy sources, balance reliability, electric energy quality, stochastic optimization, optimal structure of local electrotechnical systems, accumulation and storage of power.

## АННОТАЦИЯ

**Лысенко О. В. Научные основы повышения энергетической эффективности и качества электроснабжения в электротехнических системах с комбинированной генерацией. - Квалификационная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы. Таврический государственный агротехнологический университет имени Дмитрия Моторного,

Мелитополь, 2020.

В первом разделе выполнен обзор состояния и перспективы обеспечения потребителей электрической энергией в электротехнических системах с комбинированной генерацией. Проанализирован мировой опыт использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Проведен обзор факторов влияния ВИЭ на работу локальных электротехнических систем (ЛЭС).

Во втором разделе проанализированы метеоданные, характеризующие работу солнечных (СЭС) и ветровых (ВЭС) электростанций. Исходные данные для южного региона Украины получены по данным измерений на Ботиевской ВЭС и Токмакской СЭС. Эти данные агрегированные и представлены в параметрическом виде.

В третьем разделе исследованы данные, характеризующие потребление электрической энергии в исследуемом регионе. Проведено исследование выявления возможностей согласования генерации ВИЭ с потреблением и выполнены аналогичные исследования графиков нагрузки (потребления). Анализ случайных составляющих графиков потребления электроэнергии проведены на примере многолетних данных для нескольких населенных пунктов и местных предприятий Мелитопольского района Запорожской области.

В четвертом разделе рассматривается построение критериев и системы ограничений, определяющих оптимальность функционирования ветро-солнечной генерации. Сформулированы проблемы возобновляемой энергетики, требующие решения с применением задач оптимизации. Выполнен общий обзор методов оптимизации, подчеркнуты приемлемые подходы для решения поставленных задач. В частности, это построение поверхности отклика при имитационном моделировании, целочисленные методы для модульных систем, численные методы.

В пятом разделе приводятся методология и примеры расчета показателей балансовой надежности и их доверительных интервалов для ЛЭС. С целью повышения энергетической эффективности, а именно, максимально полного использования установленной мощности ВИЭ, рассмотрены оптимальное комбинирование ВЭС и СЭС при минимизации неконтролируемого разброса значений генерируемой мощности при максимизации произведенной энергии.

Шестой раздел касается потребностей в резервировании и аккумулировании энергии в комплексных энергетических системах с ВИЭ. Небаланс энергии как интегральная характеристика небаланса мощности зависит от продолжительности и знака отклонений генерации от потребления. График накопленных объемов избыточной и недостаточной энергии позволяет сделать выводы относительно потребностей в аккумулировании энергии.

**Ключевые слова:** локальные электротехнические системы, комбинированная генерация, возобновляемые источники энергии, балансовая надежность, качество электрической энергии, стохастическая оптимизация, оптимальная структура локальных электротехнических систем, резервирование и аккумулирования мощности.



Підписано до друку 28.09.2020 р. Зам. № 28/09/2 Формат 60x84x 1/16. Умовн. – друк. арк. 2,96.  
Наклад 100 прим. Віддруковано в ФОП Верескун Валерій Миколайович.  
Адреса: 72312, Запорізька обл., м. Мелітополь, вул. М. Грушевського, 10

