

ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ КОМБІНОВАНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З НАКОПИЧЕННЯМ ЕНЕРГІЇ

Лисенко О. В.¹, Мельник О. А.^{2,3}, Нестерчук Д. М.¹

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного,

²Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",

³Інститут відновлюваної енергетики НАН України

У статті проведена оцінка показників комбінованої локальної енергосистеми з накопиченням енергії, яка дозволяє зменшити собівартість електроенергії за рахунок оптимального підбору обладнання.

Постановка проблеми. В наш час світові країни звернули увагу на нові ризики функціонування локальних енергетичних систем (ЛЕС), при значному зростанні частки обмежено контрольованих потужностей на базі вітрової та сонячної енергії, що збільшує рівень втрат електричної енергії та впливає на пропускну здатність електромереж. Напрямом, що активно розвивається в Україні, є використання комбінованих систем генерації електричної енергії на базі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). З економічної точки зору спостерігається конкуренція між традиційною енергетикою та відновлюваною за рівнем собівартості одиниці енергії, а «зелені тарифи» є стимулом впровадження ВДЕ [1, 2]. Відновлюваним джерелам притаманні характерні особливості, а саме, залежний від погодних умов режим надходження енергії. При проектуванні та впровадженні потужних електростанцій необхідно приділяти особливу увагу до їх можливого впливу на енергетичний стан об'єднаної енергосистеми країни. Для ЛЕС в пріоритеті є оцінка надійності енергозабезпечення та визначення оптимальної конфігурації такої системи: розташування вітро- і сонячних електростанцій (ВЕС і СЕС), потужностей окремих об'єктів генерації та їх співвідношення, а також використання систем акумуляування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На підставі аналізу літературних джерел [1...3] було встановлено, що необхідність створення єдиних техніко-економічних основ оцінювання якості функціонування ЛЕС є актуальною. Головною економічною умовою при побудові та функціонуванні ЛЕС є мінімізація собівартості електроенергії [4, 5]. В якості вихідних даних до економічної оцінки ВДЕ у складі ЛЕС використовуються історичні (статистичні) дані про споживання та кліматичні фактори, що сприяють відновлюваній генерації, при цьому фіксуються погодинні середні дані та їх девіації [6]. При застосуванні ВДЕ важливим є досягнення певних показників надійності енергозабезпечення, враховуючи мінливу природу генерації ВЕС та СЕС, тому істотними показниками надійності є не лише середнє значення генерації та споживання, а й показники їх варіації (дисперсія, щільність розподілу, граничні відхилення). Оскільки стохастичність ВДЕ обумовлює ризик залишитися без достатнього енергопостачання або істотно знижує надійність останнього, виникає проблема виміру ризику і його впливу на вартість енергії [7].

Мета статті. Пропонується методологія розрахунку економічних показників комбінованої ЛЕС.

Основні матеріали дослідження. Система з ВДЕ дозволяє зменшити собівартість електроенергії за рахунок оптимального підбору обладнання, але невизначеність, пов'язана з відновлюваними енергетичними ресурсами, може спричинити ненадійне виробництво електроенергії, що в свою чергу призведе до невизначеності експлуатаційних витрат. Додатковим джерелом невизначеностей є змінний характер споживання електроенергії. Таким чином, експлуатаційні витрати на виробництво електроенергії можуть бути досить непередбачуваними. Тому потрібен статистичний аналіз, що включає оцінку стохастичності процесів, оскільки детермінований розрахунок може дати помилкове уявлення про ймовірні витрати та потенційну економію. При оцінюванні ризику як статистичного показника управління ризиком отримує надійне обґрунтування. При статистичному аналізі ризик вимірюється за допомогою такої стандартної характеристики, як дисперсія чи пов'язане з нею середньоквадратичне відхилення (СКВ). Авторами було встановлено, що при різних комбінаціях вітрової та сонячної генерації результуюча собівартість отриманої електроенергії C_{Σ} буде залежати від їх пропорції та відповідних коефіцієнтів використання встановленої потужності ($K_{\text{ВВП}}$), за умови того ж обладнання та фінансових умов, а саме

$$C_{\Sigma} = \frac{C_{\text{ВЕС}}^0 \cdot k_w^0 \cdot w + C_{\text{СЕС}}^0 \cdot k_s^0 \cdot (1-w)}{k_w \cdot w + k_s \cdot (1-w)}, \quad (1)$$

де $C_{\text{ВЕС}}^0$ - собівартість для ВЕС;

$C_{\text{СЕС}}^0$ - собівартість для СЕС;

w - відносна частка потужності ВЕС в ЛЕС;

k_s^0 - коефіцієнт використання потужності СЕС;

k_w^0 - коефіцієнт використання потужності ВЕС.

Індексом "0" позначено певні (тестові) значення собівартості та продуктивності; тоді при довільних значеннях енергетичної ефективності собівартість можна визначити з відповідної пропорції, наприклад для ВЕС: $C_{\text{ВЕС}} = C_{\text{ВЕС}}^0 \cdot k_w^0 / k_w$. Для комбінації вітро-

сонячних установок стає можливим визначити результуючу собівартість електроенергії для різних погодних умов, при цьому варіативність (СКВ) генерації є майже лінійно пропорційна номінальній потужності, а відносна СКВ ($C_v = \sigma/R$) в даних умовах залежатиме лише від показника пропорції w , за винятком малих

значень R , де R - сумарна номінальна потужність ВДЕ, а помітним стає вплив варіацій споживання.

В табл.1 наведено результати розрахунку відносної варіативності потенційного небалансу потужності як різниці генерації та споживання при фактичних природних (погодних) факторах протягом досліджених часових періодів.

Таблиця 1 – Результати розрахунку варіативності C_v небалансу потужності

w R , кВт	1	0,8	0,6	0,4	0,3	0
локального споживача при добовому прогнозуванні						
100	0,387	0,368	0,356	0,350	0,350	0,360
400	0,223	0,186	0,155	0,136	0,133	0,151
800	0,215	0,174	0,140	0,118	0,113	0,133
1200	0,214	0,173	0,137	0,114	0,110	0,130
регіональної енергосистеми (ДнЕС)						
500	0,288	0,264	0,246	0,238	0,238	0,254
1500	0,220	0,181	0,150	0,131	0,129	0,149
2000	0,217	0,177	0,144	0,123	0,120	0,122
3000	0,214	0,173	0,139	0,117	0,113	0,133

Для прикладу авторами використовуються дані моделювання поведінки локальної енергосистеми населеного пункту та регіональної енергосистеми (ДнЕС)

На рис.1 зображено множину значень ризику-доходу для різних конфігурацій ЛЕС з табл.1, а саме загальної потужності ВДЕ (R) та пропорції "вітер-сонце" (w), де доход визначає собівартість, а ризик – варіативність. Обвідна знизу множини значень є лінією можливих оптимальних значень.

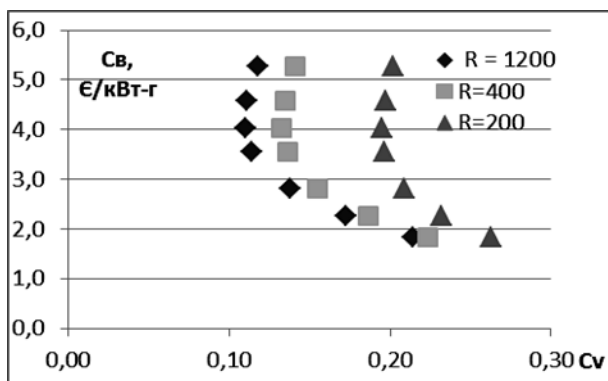


Рисунок 1 – Множина значень ризику-доходу для різних конфігурацій ЛЕС

Якщо за нейтральну точку взяти ординату мінімального значення варіативності C_v , то відповідно до методу Дж.Тобіна [8] точкою оптимуму є пропорція $w = 0,8$ з показниками $C_e = 2,3$ €/кВт·год, $C_v = 0,17$.

Автори статті зазначають, що істотною складовою капітальних витрат є вартість акумуляторних батарей (АКБ), тому собівартість енергії буде зростати пропорційно вартості АКБ, а варіативність зменшується обернено пропорційно до потужності АКБ.

Як результат, загальна потреба в АКБ визначатиметься як додатковою варіативністю при введенні ВДЕ до енергосистеми, так і заданою вимогою до надійності, а їх залежності від обсягу ВДЕ є нелінійними. Вимоги щодо надійності можна характеризувати в термінах квантилів розподілу кумулятивної енергії небалансу, яка потребує акумулявання, при цьому авторами підтверджено нормальний закон розподілу небалансу. Згідно [9] квантилі κ_γ з довірчою імовірністю γ дорівнюють: $|\kappa|_{0,8} = \kappa_{0,9} = 1,29$; $|\kappa|_{0,9} = \kappa_{0,95} = 1,64$; $|\kappa|_{0,95} = \kappa_{0,975} = 1,96$; $|\kappa|_{0,99} = \kappa_{0,995} = 2,58$. Для прикладу авторами використовуються дані табл.1 ($R=2000$ МВт), так як такий рівень впровадження ВДЕ є досить вагомим, але реальним. Потреби в акумуляванні визначаються через додане за рахунок впливу ВДЕ СКВ кумулятивної енергії: $\kappa_\gamma(\sigma_k - \sigma_k^0)$, де індекс «0» стосується іманентної варіативності споживання при відсутності ВДЕ, в даному прикладі $\sigma_k^0 = 570$ кВт·год. Показники щодо доданого за рахунок ВДЕ варіативності з різними довірчими рівнями наведено в табл.3.

Таблиця 2 – Дані для моделювання σ_k для ДнЕС, добовий прогноз (МВт·год)

w	1	0,8	0,6	0,4	0,3	0,1	0
$\gamma=0,80$	2012	1484	993	593	452	391	477
$\gamma=0,90$	2558	1886	1263	754	574	497	607
$\gamma=0,95$	3058	2254	1509	902	686	594	725
$\gamma=0,99$	4025	2967	1987	1187	903	782	955

Вартість капітальних вкладень у системи ВДЕ за оцінкою становить: для ВЕС 1200 €/кВт·год, для СЕС 700 €/кВт·год, для АКБ приблизно 200 €/кВт·год, при цьому необхідно враховувати, що термін експлуатації АКБ приблизно удвічі менший у порівнянні з іншим обладнанням. Для забезпечення заданого рівня надійності, тобто довірчої ймовірності, можна обчислити вартість капіталовкладень при впровадженні АКБ для заданого рівня впровадження ВДЕ. Оптимальну конфігурацію ВДЕ-АКБ можна обрати за методом «поверхні відгуку». На рис.2 наведена графічна залежність величини коефіцієнта зростання загальної вартості обладнання $k_{\text{кап}}$ за рахунок введення акумуляюючих потужностей при різних рівнях надійності (γ) та конфігурації ВДЕ (w).

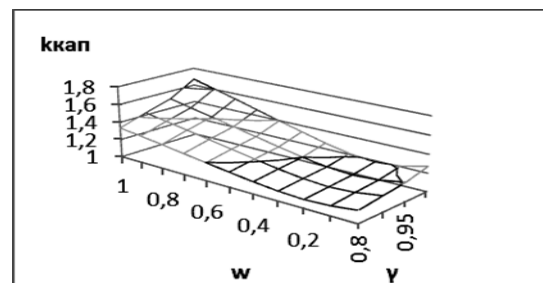


Рисунок 2 – Графічна залежність величини коефіцієнта зростання загальної вартості обладнання $k_{\text{кап}}$ за рахунок введення АКБ при різних γ та w

Як бачимо, потреба в АКБ зростає зі збільшенням неконтрольованих коливань потужності, проте щодо

конфігурації ЛЕС існують певні оптимальні співвідношення. Так, в наведеному прикладі для регіональної енергосистеми потреба в ємності АКБ складає 10-15% від добової продуктивності ВДЕ, а потужності на рівні 25% від встановленої потужності ВДЕ при забезпеченні високого рівня надійності, а саме, понад 95% гарантованого забезпечення. Дані співвідношення можуть різнитися для різних режимів споживання, пір року та типу обладнання, при цьому слід враховувати можливість завчасного передбачення рівнів споживання та генерації, а також надійність роботи традиційних (керованих) джерел енергії.

Як приклад, на рис. 3 зображується конфігурація комбінованих систем зберігання енергії з традиційним накопиченням теплоти й електроенергії та додатковим способом зберігання енергії через виробництво водню. Завдяки акумулятору ця конфігурація забезпе-

чує чудові можливості для оптимізації електролізера та паливного елемента, зростання їх ефективності та тривалості життєвого циклу за рахунок обмеження робочих діапазонів, кількості вмикання / вимикання та запобігання стрибкам потужності та динамічним навантаженням. У цій конфігурації комбінованих систем зберігання енергії електролізер та паливні елементи повинні лише компенсувати максимуми відносно довгострокових тенденцій генерації та споживання.

Такі конфігурації комбінованих систем зберігання енергії можуть бути застосовані для надійного енергозабезпечення, нульових шкідливих викидів, в мережних та автономних системах, з різними можливостями зберігання водню та накопичення тепла (наприклад, будівля інтегрована або централізована на рівні району чи громади, можливо, з доступом до місцевої тепло- та/або газової мережі).

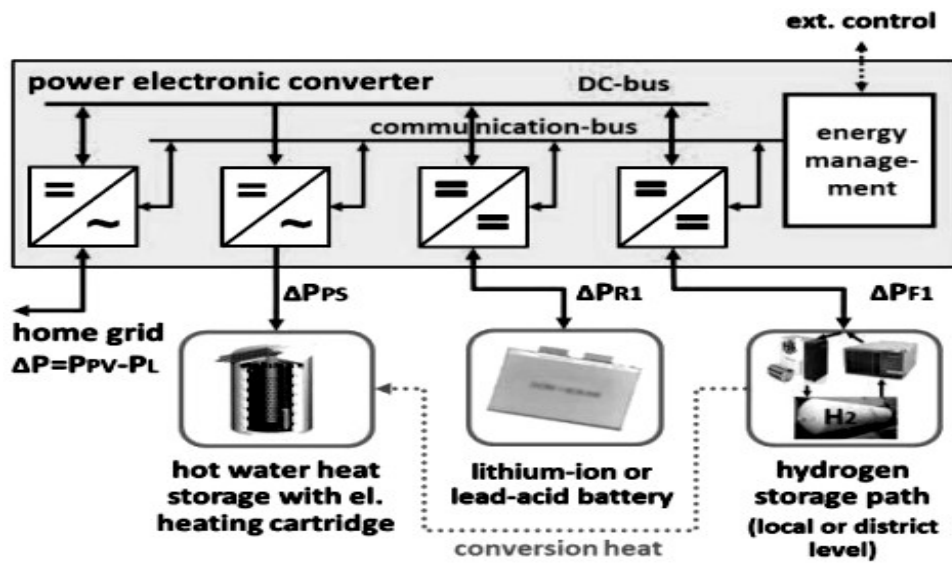


Рисунок 3 – Варіант комбінованих систем зберігання енергії з додатковим виробництвом водню [10]

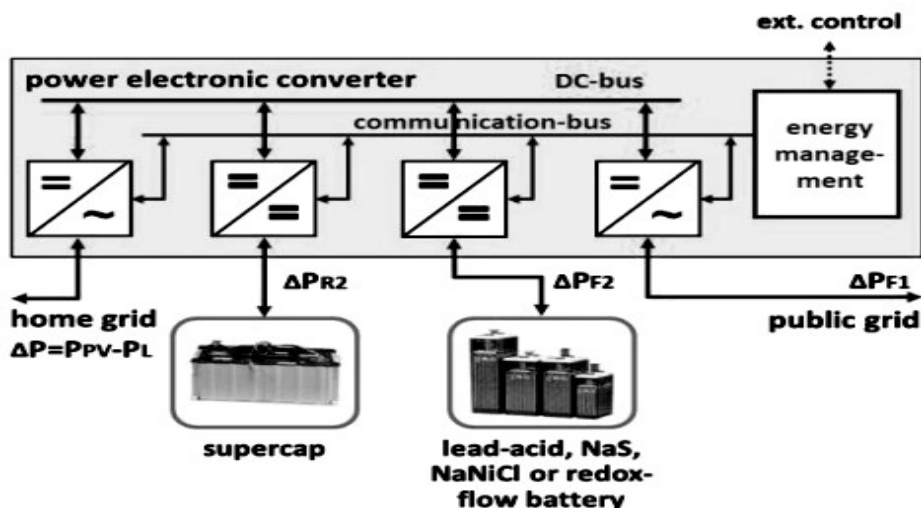


Рисунок 4 – Варіант комбінованих систем зберігання енергії з суперконденсатором та АБ [10]

На рис. 4 показано конфігурацію комбінованих систем зберігання енергії для покриття коротко- та середньострокового часових діапазонів. Суперконденсатор тут функціонує як "високо потужний" накопи-

чувач, для покриття піків, компенсації перехідних процесів та швидкоплинних коливань потужності. Це допомагає уникати перенапруги акумулятора (наприклад, високих струмів зарядки та циклів мікрозарядки

для свинцево-кислотного акумулятора) і, як наслідок, збільшує тривалість життя батареї.

Аналогічна комбінована система зберігання енергії, лише з застосуванням "потужної" батареї (наприклад, батареї літій-іонної або з літій-титанатами) замість суперконденсатора. У цьому випадку накопичувачем міг би бути, наприклад, дешевий свинцево-кислотний акумулятор (зі спеціальними додатковими заряджаючими/розрядними пристроями, пристосованими до літій-іонної батареї робочими характеристиками).

Замість свинцево-кислотного акумулятора можна використовувати редокс-проточну або високотемпературну батарею для середньострокових коливань потужності. Отримана "гібридна батарея" може бути корисною для багатьох схем з використанням відновлюваних джерел енергії. Для такої конфігурації потрібен інтелектуальний контроль заряду (для обох батарей) та стратегії управління енергією, здатні точно моделювати заряд акумулятора, їх стан та оцінку впливу різних режимів роботи на тривалість служби акумулятора.

Популярні технології акумуляторних батарей, які в даний час використовуються для стаціонарних системних розробок, включають свинцево-кислотні, сірчано-натрієві (NaS), хлорид натрію-нікелю (NaNiCl₂), також відомий як ZEBRA, нікель-кадмієві (Ni-Cd), літій-іонні (Li-іон), бромистий цинк (Zn-Br), полісульфідний бром (PSB) і ванадій-редокс (VRB), а також нові системи, такі як новітні регульовані клапани (VRLA), свинцево-вуглецеві, метало-повітряні технології, UltraBattery, акумулятори з поліпшеним колектором струму, високоефективний хлорид натрію, нано-структуровані енергетичні матеріали в літійєвих батареях та ін. [10].

Деякі відомі сучасні практичні застосування акумуляторних батарей в енергосистемах на основі відновлюваних джерел енергії можна охарактеризувати наступним чином [11]:

1. Крупні ВЕС з розподіленим енергозбереженням. Поєднання вітрового ресурсу з розподіленим акумуляванням допоможе вирішити проблему нерівномірності генерації вітрової енергії. Таким чином, ВЕС значної потужності можуть бути інтегровані з існуючою мережею.

2. Комунальні системи зберігання енергії (CES). Система батарей для спільного зберігання енергії може бути розроблена для острівних енергосистем, коли локалізований сектор розподільної енергетичної системи ізольовано від мережі. Вона може підтримувати поточні потреби користувачів, наприклад забезпечити резервну потужність.

Акумуляторні системи також використовуються як частина повністю автономної системи генерації енергії з сонячною енергією, вітром, малою гідроенергетикою, використанням біомаси та/або дизельної електростанції, що обслуговує окремі споруди або комунальні мережі.

3. Розподілена інтегрована до мережі PV-система. Приєднана безпосередньо до мережі або розташована та підключена поруч з фотоелектричною станцією система акумулявання допомагає регулювати швидкі зміни генерації, добові коливання, питання якості по-

стачання енергії - зайві гармоніки та невідповідність між потужністю СЕС та потребою користувачів, характерних для мережевих PV-систем без акумулявання енергії.

4. Транспортні засоби з накопичувачами енергії. Система розподілених акумуляторних батарей, встановлених до електричних транспортних засобів, може бути частиною локалізованої стратегії енергетичної системи для інтеграції розподіленої енергії сонячної енергії з забезпеченням надійності енергопостачання в певній частині електромережі.

5. Управління рівнем споживання кінцевого користувача. Система зберігання може бути використана для зниження вартості електропостачання. Така програма може допомогти кінцевим користувачам "зміщувати час" споживання енергії з СЕС або інших варіантів ВДЕ, або бути використаною для інтеграції сусідньої PV-системи. У цьому випадку регульовані (зонні) тарифи на енергію спонукають використовувати системи зберігання для зменшення витрат на електроенергію при зміщенні часу заряджання в зону низького тарифу, з подальшим використанням накопиченої енергії в час, коли попит і ціна високі.

6. Гнучкий піковий ресурс. "Піки" або "пікові ресурси" призначені для обслуговування пікового попиту на електроенергію.

Однією з альтернатив є варіант зберігання енергії, наприклад, акумулятор, який може забезпечити чутливий та досить гнучкий ресурс в порівнянні з адміністративним підходом до керування попитом. Використання модульного акумулятора для обслуговування максимального попиту може також буде економічно ефективним.

7. Регулювання частоти. Традиційно частотне регулювання є по суті зміною виробничої електричної потужності в терміни до хвилин. Однак акумулявання електроенергії має потенціал, що забезпечить це завдання за мілісекунди, а також має економічну перспективу. Система акумулявання є одним із популярних варіантів забезпечення стабільності в електромережі.

8. Обертовий резерв. Зазвичай комунальні підприємства беруть на себе відповідальність за можливість суміщення втрати потужності найбільшого електрогенератора в мережі з мінімальним потоком навантаження та відхиленнями частоти струму.

У цій ситуації всі генератори мають частку резервних можливостей, пов'язаних з їх первинним джерелом енергії та інерцією. У випадку теплової електростанції витрачається додаткове паливо, оскільки генератор буде працювати нижче його номінальної потужності. Сьогодні використовуються системи зберігання енергії для забезпечення можливості резерву через спеціальні перетворювачі, які взаємодіють з енергосистемою.

9. Відстрочка на модернізацію систем передачі та розподілу (T&D). Системи зберігання є ключовим варіантом для відкладення або уникнення потреби у модернізації передавальної та розподільчої апаратури. Оскільки модульна конфігурація системи зберігання, наприклад акумулятор, може бути використана для обслуговування невеликої кількості пікового попиту, не буде необхідності збільшення потужностей T і D у

короткостроковій перспективі. Це також допомагає подовжити термін експлуатації обладнання T і D.

10. Системи безперебійного живлення (UPS). Акумуляторна система є важливим компонентом UPS-технологій, що використовуються для забезпечення стабільної та надійної потужності у випадку чутливості до критичних навантажень, наприклад, для медичного, освітлювального та комунікаційного обладнання, щоб мінімізувати або уникнути втрати працездатності або пошкодження обладнання.

Висновок. Наведені приклади стосуються певних кліматичних умов, характеру споживання енергії, технічних та вартісних показників обладнання, але загальний характер поведінки параметрів, за якими можна оптимізувати енергосистему з ВДЕ, в безрозмірних параметрах має схожий вигляд незалежно від масштабу: як для окремого населеного пункту, так й для групи населених пунктів чи регіональної енергосистеми в цілому. Різниця полягатиме лише в конкретних числових показниках, що застосовуються в математичній моделі, та в результуючих співвідношеннях.

Дані висновки ґрунтуються як на імітаційному моделюванні, так й на безпосередній перевірці шляхом аналізу статистичних даних як сполучної ланки між спостереженнями та моделюванням, тому можна вважати достатньо адекватною запропоновані математичні моделі представлення випадкових процесів, що описують балансування споживання та генерації електроенергії з використанням вітрової та сонячної енергетики.

Перелік задач, які можуть вирішуватися в рамках даних моделей, належать переважно до питань оптимізації енергосистем на базі відновлюваної енергетики, оцінки результатів експлуатації таких систем, розрахунку очікуваних показників при постановці задач енергопостачання та передпроектних досліджень. А головною метою має бути забезпечення надійності постачання та якості енергії, енергетичної та економічної ефективності.

Стаття підготовлена в рамках виконання проектів науково-технічних робіт та цільових програм Національної академії наук України: "Комплекс-М", "Комплекс-3" (КПКВК 6541030); Міністерства освіти і науки: "Ресурсоенергозберігаючі режими передачі і перетворення енергії в агропромисловому комплексі" ДР № 0116u002726, "Автоматизація електротехнічних систем в АПК" ДР № 0116u002728.

Список використаних джерел

1. Кузнецов М. П. Деякі особливості автономної роботи вітрової та сонячної електростанцій. *Відновлювана енергетика*. 2016. №2. С.15-21.
2. Василенко В. І. Формування оптимальної структури локальної електроенергетичної системи на основі оцінки міри близькості розміщення об'єктів. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. №1. С.36-46.
3. Кузнецов М. П., Ужейко С. О. Імовірнісні аспекти використання відновлювальних джерел енергії в зоні відчуження Чорнобильської АЕС. *Відновлювана енергетика*. 2016. №3. С.6-12.

4. Айвазьян В. Г., Захарин А. Г. К вопросу о пересмотре и уточнении основных положений технико-экономических расчетов в энергетике. В кн.: *Технико-экономические расчеты в энергетике*. Москва, 1965. С. 3-23.

5. Арзамасцев Д. А. Об учете фактора времени и критерий экономической эффективности капиталовложений для энергетических систем. *Изв. вуз. Энергетика*. 1968. № 2. С. 114-118.

6. T.D.Tran, A.D.Smith. Stochastic Optimization for Integration of Renewable Energy Technologies in District Energy Systems for Cost-Effective Use / *Energies* 2019, v.12(3), p.533, doi:10.3390/en12030533.

7. Велькин В. И. Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах: монография. Екатеринбург : УрФУ, 2015. 226 с.

8. Tobin J. The Theory of Portfolio Selection / F. H. Hahn and F. R. P. Brechling (eds). *The Theory of Interest Rate*. London : Macmillan, 1965. P. 3-51.

9. Миллер Б. М., Панков А. Р. Теория случайных процессов в примерах и задачах. Москва : Физматлит, 2002. 320 с.

10. D.Akinyele, J.Belikov, Y.Levron. Battery Storage Technologies for Electrical Applications: Impact in Stand-Alone Photovoltaic Systems. *Energies*. 2017. V.10, 39 с. URL: www.mdpi.com/journal/energies

11. Energy Storage Association. URL: <http://energystorage.org> (accessed on 15 September 2017).

Аннотация

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С НАКОПЛЕНИЕМ ЭНЕРГИИ

Лысенко О. В., Мельник А. А.,
Нестерчук Д. М.

В статье проведена оценка показателей комбинированной локальной энергосистемы с накоплением энергии, которая позволяет уменьшить себестоимость электроэнергии за счет оптимального подбора оборудования.

Abstract

ASSESSMENT OF THE COMBINED LOCAL ENERGY SYSTEM INDICATORS WITH ENERGY STORAGE

O. Lysenko, O. Melnik,
D. Nesterchuk

The article assesses the performance of a combined local power system with energy storage, which allows reducing the energy cost due to the optimal selection of equipment.