

АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ УКРАЇНИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі розглянуто стратегічну роль застосування систем накопичення енергії для покращення стабільної та більш стійкої роботи об'єднаної енергосистеми України. Проаналізовано технічну необхідність впровадження систем накопичення енергії (СНЕ) для заміщення втрачених маневрених потужностей та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Визначено, що для України системи накопичення є ключовим інструментом децентралізації енергетики та виконання вимог ENTSO-E щодо регулювання частоти.

Ключові слова: об'єднана енергетична система України, відновлювані джерела енергії, енергетична стійкість, системи накопичення енергії, децентралізація, допоміжні послуги, маневрена потужність, зміщення навантаження, зрізання піків.

Abstract

The paper examines the strategic role of energy storage systems in improving the stable and more sustainable operation of the unified power system of Ukraine. The technical necessity of implementing energy storage systems (ESS) to replace lost maneuvering capacities and integrate renewable energy sources is analyzed. It is determined that for Ukraine, storage systems are a key tool for energy decentralization and meeting ENTSO-E requirements for frequency regulation.

Keywords: unified power system of Ukraine, renewable energy sources, energy sustainability, energy storage systems, decentralization, ancillary services, maneuvering capacity, load shifting, peak shaving.

Вступ

Повномасштабна військова агресія росії проти України спричинила масштабні руйнування розподільних електричних мереж, що істотно послабило їх надійність і стійкість. Ситуацію ускладнили високий рівень фізичного зносу обладнання, недостатнє резервування схем живлення, залежність від великих централізованих підстанцій та обмежена інтеграція сучасних технологічних рішень. Сукупність цих факторів різко підвищила вразливість мереж до пошкоджень. У результаті індикатори SAIDI (середня тривалість перерв електропостачання) та SAIFI (частота відключень на одного споживача) значно перевищували середні показники країн ЄС, що свідчило про критичний стан мережевої інфраструктури та потребу в її модернізації. Подолання виявлених обмежень створює передумови для суттєвого зміцнення енергосистеми. Зокрема, інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), запровадження систем накопичення енергії (СНЕ) та розгортання технологій Smart Grid забезпечують можливість підвищення надійності та гнучкості мереж [1].

Енергосистема України перебуває в стані масштабної трансформації, зумовленої як військовими викликами, так і зобов'язаннями щодо «зеленого переходу». Руйнування значної частини теплової та гідрогенерації призвело до гострого дефіциту маневрених потужностей, необхідних для покриття пікових навантажень [2].

У цих умовах накопичувальне обладнання перестає бути лише засобом оптимізації ВДЕ і стає необхідною складовою енергетичного виживання. Аналіз важливості застосування СНЕ для України потребує перегляду підходів до балансування мережі та прискорення переходу до моделі децентралізованої інтелектуальної мережі.

Результати дослідження

Сучасний стан об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України характеризується критичною потребою у

підвищенні гнучкості та маневреності генеруючих потужностей. Внаслідок значних пошкоджень об'єктів традиційної теплової та гідрогенерації, а також стрімкої інтеграції ВДЕ, виникає гострий дефіцит резервів для балансування добових графіків навантаження. Згідно з оновленим «Звітом з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей» НЕК «Укренерго», для забезпечення операційної безпеки та надійності мережі станом на 2025–2026 роки потреба енергосистеми у СНЕ становить приблизно 1,3 ГВт [3].

Впровадження установок зберігання енергії (УЗЕ) є стратегічним кроком не лише для мінімізації небалансів, а й для виконання міжнародних зобов'язань України в межах синхронної зони ENTSO-E щодо забезпечення резервів підтримки частоти (FCR) та відновлення частоти (FRR). Використання СНЕ дозволяє ефективно вирішувати проблему «негативних цін» на ринку та обмежень видачі потужності сонячних і вітрових електростанцій, що підтверджується світовими трендами зниження вартості систем накопичення (LCOE) [4]. Таким чином, аналіз доцільності та ефективності інтеграції накопичувального обладнання є необхідною умовою для розбудови децентралізованої та стійкої енергосистеми України.

Технічна ефективність впровадження СНЕ в енергосистему України обумовлена насамперед їхньою високою динамічною гнучкістю. Головна перевага літій-іонних та інших хімічних накопичувачів полягає в їхній здатності забезпечувати миттєвий відгук на команди диспетчера. Якщо традиційному вугільному енергоблоку потрібні десятки хвилин для зміни потужності, то промислова батарея реагує в межах 20–100 мілісекунд, що є вирішальним для підтримки частоти 50 Гц та запобігання каскадним аваріям у моменти раптових дефіцитів. Це є критично важливим для стабільної роботи синхронної зони ENTSO-E. Крім того, ККД літій-іонних систем становить 85–92%, що робить їх ефективнішими за гідроакumuлюючі станції (ГАЕС) у короткостроковому регулюванні [5].

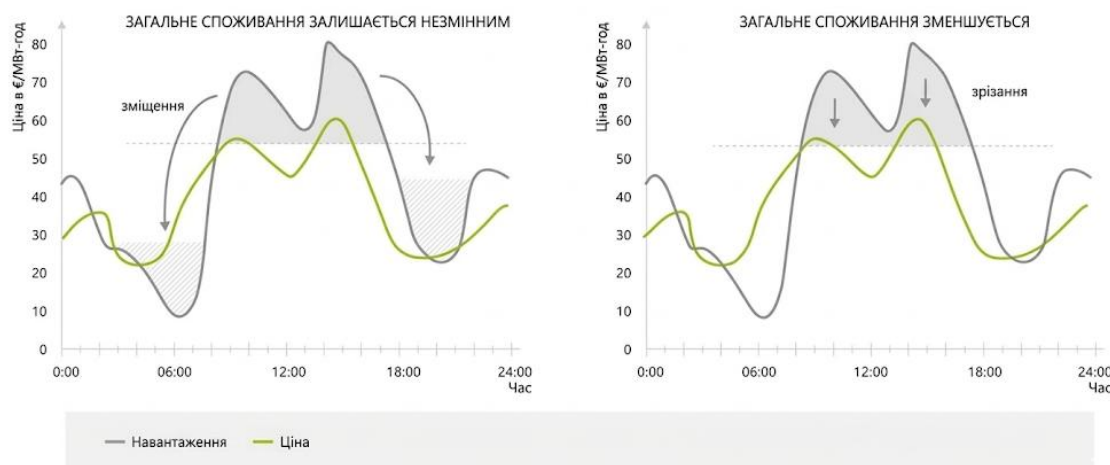


Рис. 1. Графік добового покриття навантаження (зміщення навантаження проти зрізання піків)

Важливим аспектом дослідження є роль накопичувачів у процесі децентралізації енергетики. Впровадження розподілених систем (BESS) потужністю від 1 до 50 МВт у різних вузлах мережі дозволяє створювати так звані «острови стійкості». Це означає, що у разі пошкодження магістральних ліній електропередач, локальні громади або об'єкти критичної інфраструктури можуть працювати автономно, використовуючи комбінацію сонячної генерації та накопичених резервів. Це докорінно змінює архітектуру ОЕС України, роблячи її менш вразливою до точкових ударів по великих електростанціях, оскільки ресурс стає розосередженим.

Сучасні системи накопичення енергії класифікуються за типом технології, серед яких найбільшого поширення набули електрохімічні накопичувачі, зокрема літій-іонні акумулятори. Їх перевагами є висока питома енергія, швидкодія, можливість роботи в широкому діапазоні навантажень та відносно високий коефіцієнт корисної дії (до 90–95 %). Альтернативними рішеннями є натрій-сірчані батареї, які характеризуються високою енергоємністю та ефективністю при довготривалому зберіганні, а також проточні (flow) батареї, де енергія зберігається в рідкому електроліті, що забезпечує практично необмежену кількість циклів заряд-розряд та підвищену пожежну безпеку. Водночас свинцево-

кислотні акумулятори поступово втрачають актуальність у великих енергосистемах через нижчий ресурс та ефективність.

Серед сучасних промислових рішень важливе місце займає продукція Huawei Digital Power, зокрема система Smart String ESS. Дана технологія реалізує модульний принцип побудови, при якому кожен акумуляторний модуль має індивідуальне керування та моніторинг. Це дозволяє підвищити надійність системи за рахунок зменшення впливу відмов окремих елементів, оптимізувати роботу батарей шляхом балансування та знизити втрати енергії. Крім того, система підтримує інтелектуальні алгоритми керування, що забезпечують адаптацію до змінних умов навантаження та генерації, що є особливо важливим при інтеграції відновлюваних джерел енергії.

У свою чергу, рішення компанії Tesla - Tesla Megapack - орієнтоване на масштабні енергосистеми та реалізацію централізованих накопичувальних потужностей. Основною перевагою даної системи є високий рівень заводської інтеграції, що включає силову електроніку, системи охолодження та керування в єдиному модулі. Це значно скорочує терміни введення в експлуатацію та знижує витрати на монтаж. Також Megapack забезпечує ефективне централізоване керування та можливість швидкого реагування на зміну режимів роботи енергосистеми, що робить його особливо ефективним для надання допоміжних послуг, таких як регулювання частоти та покриття пікових навантажень.

Провівши певний аналіз зазначених рішень стає зрозуміло, що системи типу Smart String ESS від Huawei Digital Power є більш доцільними для розподілених енергетичних систем та об'єктів середньої потужності, де критичними є гнучкість, масштабованість та підвищена надійність за рахунок децентралізованої архітектури. Натомість Tesla Megapack від Tesla демонструє переваги у великих централізованих проєктах, де ключову роль відіграють швидкість розгортання, висока щільність потужності та ефективність управління великими енергетичними потоками.

З економічної та регуляторної точок зору, розвиток систем накопичення в Україні стимулюється відкриттям ринку допоміжних послуг. Оператор системи передачі (НЕК «Укренерго») вже залучає інвесторів до надання резерву підтримки частоти (РПЧ). Аналіз показує, що використання СНЕ для арбітражу (зарядка за низьким нічним тарифом та видача в мережу в години пікових цін) дозволяє не лише згладжувати графік навантаження, а й забезпечувати окупність проєктів у середньостроковій перспективі. Таким чином, накопичувальне обладнання виконує подвійну роль: технічну стабілізацію частоти та напруги, а також економічну оптимізацію вартості електроенергії для кінцевого споживача через зменшення потреби в дорогій піковій генерації [6, 7].

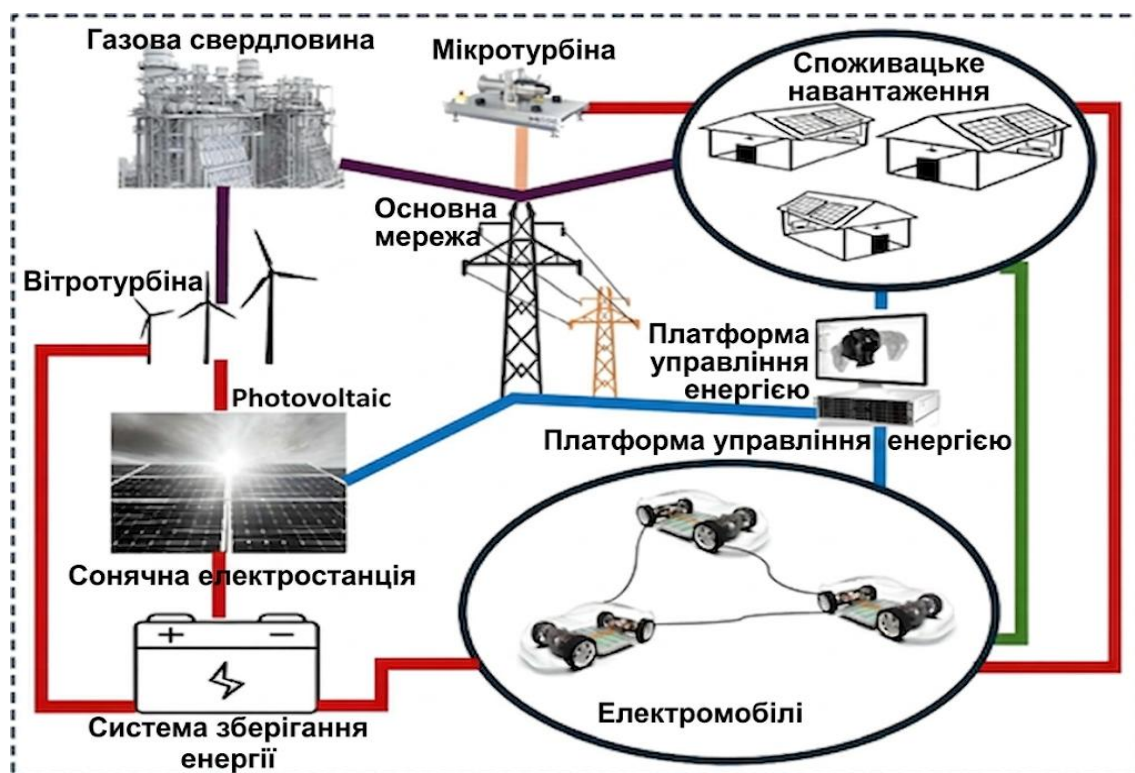


Рис. 2. Схема інтеграції СНЕ у Smart Grid

Висновки

Проведене дослідження підтверджує, що впровадження систем накопичення електроенергії є важливою необхідністю для забезпечення стабільної роботи енергосистеми України в умовах сучасних викликів. Інтеграція СНЕ дозволяє ефективно компенсувати дефіцит маневрених потужностей, спричинений руйнуванням традиційної генерації, та забезпечує необхідну гнучкість для подальшого розвитку відновлюваної енергетики. Використання технологій зрізання піків та зміщення навантаження не лише стабілізує технічні параметри мережі, а й створює передумови для зниження вартості електроенергії через оптимізацію роботи ринку. Для України розвиток цього сектору є ключовим інструментом децентралізації енергетики, що суттєво підвищує загальну стійкість системи до зовнішніх втручань та гарантує виконання вимог щодо синхронізації з європейською мережею ENTSO-E.

Подальше масштабування таких рішень потребує вдосконалення нормативно-правової бази, зокрема впровадження механізмів стимулювання для приватних інвесторів, вдосконалення механізмів стимулювання на ринку допоміжних послуг та розробку національних стандартів диспетчеризації розподілених систем накопичення. Впровадження систем накопичення енергії є стратегічною необхідністю для енергонезалежності України. Крім того, застосування систем накопичення енергії дає більше можливостей для «зеленого» переходу та інтеграції української мережі до європейської системи ENTSO-E.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Малогулко Ю.В., Тептя В.В., Остра Н.В., Сікорська О.В., Затхей К.О. Ключова роль розподільних електричних мереж у післявоєнній відбудові енергетичної системи України. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 36 (75) № 6 частина 1, 2025. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/18>.
2. Кириленко О. В., Павловський В. В., Блінов І. В. Науково-технічне забезпечення організації роботи ОЕС України в синхронному режимі з європейською континентальною енергетичною системою ENTSO-E // Технічна електродинаміка. – 2022. – № 5. – С. 59–66.
3. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2024–2025 рр. / ПрАТ «НЕК «Укренерго». — К., 2025. — URL: <https://ua.energy/>
4. Renewable Power Generation Costs in 2024 / International Renewable Energy Agency (IRENA). — Abu Dhabi, 2025. — 188 p. — URL: <https://www.irena.org/>
5. Стогній Б. С., Сопель М. Ф., Варський Г. М., Яковлева І. В. Системи синхронізованих вимірів в електроенергетиці. Підвищення точності та метрологічне забезпечення // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2013. – Вип. 35. – С. 37–47. <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/>
6. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо запровадження систем накопичення енергії» від 15.02.2022 № 2046-IX.
7. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII // Відомості Верховної Ради України. 2017. № 27–28. ст. 312.

Бачинський Роман Валентинович — студент групи ІЕС-22б, Факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: firesapfire@gmail.com

Науковий керівник: **Остра Наталя Вікторівна** – канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: natalyaostra@ukr.net

Bachynskiy Roman V. — student of group ІЕС-22b, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: firesapfire@gmail.com

Supervisor: **Ostra Natalia V.** - Cand. Sc. (Eng), Associate Professor of the Department of Electrical Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: natalyaostra@ukr.net