УДК 621.311.1
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).21

WORLD EXPERIENCE IN OVERCOMING GENERATING CAPACITY SHORTAGES AND COMPARISON WITH THE ENERGY SYSTEM OF UKRAINE

СВІТОВИЙ ДОСВІД ПОДОЛАННЯ ДЕФІЦИТУ ГЕНЕРУЮЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ТА ПОРІВНЯННЯ З ЕНЕРГОСИСТЕМОЮ УКРАЇНИ

Hlib M. Strunkin
strunkingleb@gmail.com
ORCID: 0009-0009-1719-4132

Г. М. Стрункін,
магістр, інженер

"Pluton IC" LLC, Zaporizhzhya
ТОВ «Плутон ІС», м. Запоріжжя

Abstract. *Purpose*. The study aims to conduct a comprehensive comparative analysis of global engineering scenarios for overcoming generating capacity shortages and to provide a scientific substantiation of the operational features of the Unified Energy System of Ukraine under centralized control of hourly shutdown schedules and parallel synchronous operation with ENTSO-E. *Methods*. The paper applies methods of systems and comparative technical-economic analysis of crisis operational modes based on official government reports. *Results*. International experience (models of Armenia, the Balkans, South Africa, Lebanon, Tajikistan, and the EU) is systematized based on criteria of grid controllability preservation. A core systemic technological paradox is formulated, according to which the risk of a destabilizing «charging avalanche» effect scales up in the energy system of Ukraine precisely due to the successful preservation of national grid integrity and high operational discipline of Ukrenergo's dispatch control. Energizing feeders according to hourly shutdown queues artificially synchronizes the consumer demand of a large number of residential inverters, forcing them to simultaneously charge batteries via the Constant Current algorithm. This action drives the group coincidence factor to its upper limits, resulting in prolonged overloads. *Scientific novelty*. The physical nature of the «charging avalanche» in distribution networks has been mathematically substantiated as a process fundamentally different from the classical Cold Load Pickup theory regarding the duration and behavior of active load profiles. *Practical significance*. The study establishes the fundamental theoretical and methodological frameworks for the further comprehensive investigation of the «charging avalanche» phenomenon across the national grid.
Key words: unified energy system; capacity shortage; comparative analysis; energy storage systems; charging avalanche; demand-side maneuvering; inverter equipment.

Анотація. *Мета роботи*. Комплексний компаративний аналіз світових сценаріїв подолання дефіциту генеруючих потужностей, а також обґрунтування режимних особливостей Об'єднаної енергетичної системи України в умовах централізованого керування графіками погодинних відключень та синхронної роботи з ENTSO-E. *Методика*. Застосовано методи системного порівняльного аналізу кризових режимів на основі урядових звітів. *Результати*. Систематизовано міжнародний досвід (Вірменія, Балкани, ПАР, Ліван, Таджикистан, ЄС) за критеріями збереження керованості мереж. Сформульовано парадокс, за яким ризик виникнення дестабілізуючого ефекту «зарядної лавини» масштабується в енергосистемі України саме завдяки успішному утриманню цілісності мережі та високої операційної дисципліни НЕК «Укренерго». Увімкнення фідерів за чергами ГПВ штучно синхронізує у часі споживання велику кількість інверторів побутових споживачів, які одночасно переходять у режим заряду за алгоритмом Constant Current. Це піднімає груповий коефіцієнт одночасності до граничних, викликаючи тривале перевантаження. *Наукова новизна*. Обґрунтовано фізичну природу виникнення «зарядної лавини» в розподільчих мережах як процесу, що докорінно відрізняється від класичної теорії Cold Load Pickup за тривалістю та характером активного навантаження. *Практична значущість*. Сформовано фундаментальні теоретичні та методологічні засади для подальшого вивчення «зарядної лавини» в масштабах національної енергосистеми.
Ключові слова: об'єднана енергетична система; дефіцит потужності; порівняльний аналіз; системи накопичення енергії; зарядна лавина; маневрування попитом; інверторне обладнання.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасний етап розвитку Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України проходить в умовах безпрецедентного у світовій історії фізичного дефіциту генеруючих та маневрових потужностей. Масовані пошкодження об'єктів критичної інфраструктури, зокрема теплових та гідроелектростанцій, призвели до втрати понад 9 ГВт маневрового потенціалу [1]. Це змусило системного оператора НЕК «Укренерго» перейти до режиму перманентного впровадження графіків обмеження та погодинних відключень для збереження цілісності мережі [2].

Унікальність вітчизняної ситуації полягає в тому, що попри масштабні руйнування, ОЕС України повністю зберігає операційну керованість, жорстку технічну дисципліну та продовжує стабільну паралельну роботу з європейським об'єднанням ENTSO-E [3]. Синхронізація з європейським енергопростором накладає на НЕК «Укренерго» суворі зобов'язання щодо дотримання частотної стабільності та планового сальдо міждержавних перетоків. За умов, коли ліміти імпорту електроенергії не здатні самостійно покрити дефіцит, забезпечення нормативної якості енергії стає критично складним диспетчерським завданням.

Водночас тривала дія обмежень спровокувала стихійну та масову автономізацію побутового сектору. Українські споживачі здійснили колосальний «технологічний стрибок», розгорнувши розосереджену мережу приватних систем накопичення енергії (СНЕ) на базі літієвих акумуляторів та інверторів [4]. Станом на сьогодні сумарна встановлена потужність побутових зарядних станцій, які перебувають поза операційним контролем диспетчерів, сягнула 1,6 ГВт, що за масштабами відповідає потужності великого ядерного реактора [5]. Наукова та практична актуальність дослідження зумовлена необхідністю глибокого порівняльного аналізу світових моделей подолання енергодефіциту та визначення специфічних рис ОЕС України для забезпечення надійної паралельної роботи з енергосистемою Європи.

Сучасна світова практика має значний досвід подолання гострих енергетичних криз. Проте жоден із відомих історичних прецедентів не дає готових інженерних та інституційних шаблонів для поточної ситуації в Україні. Головна проблема полягає у виникненні унікального технологічного та структурного протиріччя: з одного боку, на відміну від світових випадків колапсу чи деградації державних енергокомпаній, НЕК «Укренерго» повністю утримує операційний контроль над ОЕС та забезпечує її роботу відповідно до жорстких стандартів якості європейського об'єднання ENTSO-E. З іншого боку, в розподільчих мережах стихійно функціонує гігантський некерований масив побутових СНЕ. Виникає гостра потреба в системному порівнянні українських реалій із закордонними аналогами для чіткого визначення специфіки керування ОЕС України в умовах масової автономізації споживачів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз наукової літератури свідчить, що більшість існуючих досліджень фокусуються на детальному вивченні специфіки кризових режимів та реформ виключно всередині кожної окремо взятої країни.

Зокрема, досвід глибокої енергетичної ізоляції, функціонування в умовах паливного браку та переходу від блекаутів до відносної стабільності на прикладі вірменської ситуації детально досліджено у монографії [6] та досліджені [7]. Технічні наслідки воєнних руйнувань інфраструктури, розпад єдиного енергопростору на ізольовані райони та інженерні етапи подальшого об'єднання з європейською мережею у межах Балканського регіону детально зафіксовано в системних оглядах Міжнародного енергетичного агентства [8], а ресинхронізацію з європейською енергосистемою – в [9]. Інституційні чинники виникнення дефіциту потужностей та реакція споживачів на тривалі адміністровані обмеження через інвестиції у власну мікрогенерацію детально вивчені на прикладі Південно-Африканської Республіки у дослідженнях [10; 11]. Аналіз досвіду Лівану, Таджикистану та ЄС підкреслює різні аспекти функціонування енергосистем: від децентралізації в умовах дефіциту енергоносіїв [12; 13] до впливу гідрозалежності [14; 15] та впровадження ринкових механізмів DSM [16]. Дослідження підтверджують необхідність гнучкого управління мережами, диверсифікації генерації та цифровізації для забезпечення стабільності [17]. Крім того, загальні інвестиційні розриви, знос мережевої інфраструктури та ризики для систем релейного захисту та автоматики під час масового відновлення навантаження – Cold Load Pickup (CLPU) – розглядалися у працях [18; 19], а для українського випадку за наявності величезного масиву СНЕ – в роботі автора [20].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Головний недолік існуючого масиву наукових публікацій полягає в тому, що попри глибоке вивчення виключно локальних ситуацій у кожній окремій країні, у світовій та вітчизняній практиці повністю відсутній системний порівняльний аналіз цих закордонних сценаріїв з унікальними реаліями ОЕС України.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є проведення комплексного компаративного аналізу світових сценаріїв подолання дефіциту генеруючих потужностей та виявлення структурно-технологічних відмінностей від них Об'єднаної енергетичної системи України.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є режими роботи Об'єднаної енергетичної системи України та її низьковольтних і середньовольтних розподільчих мереж в умовах глибокого дефіциту маневрових потужностей і масового некерованого впровадження побутовими споживачами приватних інверторних систем накопичення енергії.

Предметом дослідження є структурно-технологічні закономірності міжнародних моделей долання енергодефіциту.

Методи дослідження базуються на комплексному та системному підходах із використанням методів системного та порівняльного аналізу – застосовано для систематизації світового досвіду (на прикладі Вірменії, Балкан, ПАР, Лівану, Таджикистану та ЄС) на основі офіційних звітів профільних міністерств енергетики та міжнародних інституцій з метою виявлення унікальних режимних умов ОЕС України.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для розв'язання поставленої мети необхідно детально проаналізувати та розширити кожен історичний прецедент подолання критичного дефіциту потужності. Це дозволить зіставити їхні ключові техніко-економічні параметри з поточним станом Об'єднаної енергетичної системи України.

1. Модель глибокої ізоляції та ядерного виживання: досвід Вірменії (1992–1995 рр.).

Детальний аналіз системної енергетичної кризи у Вірменії, зафіксований у звітах Світового банку [6], дозволяє кваліфікувати цей історичний прецедент як класичний приклад повної деградації паливно-енергетичного комплексу в умовах геополітичної ізоляції та транспортної блокади. Коріння вірменського енергетичного колапсу було закладено у 1989 році, коли під тиском громадського екологічного руху після Спітакського землетрусу було прийнято рішення про вимушену зупинку Мецаморської АЕС, яка забезпечувала близько сорока відсотків усього виробництва електроенергії в республіці [7]. З розпадом Радянського Союзу та початком Нагірно-Карабахського конфлікту країна опинилася в умовах тотальної економічної та паливної блокади, втративши регулярні постачання природного газу, вугілля та мазуту з суміжних територій.

У цих екстремальних обставинах функціонування Об'єднаної енергетичної системи Вірменії було зведено до критичної, технічно нераціональної експлуатації гідроенергетичного потенціалу Севан-Разданського каскаду ГЕС. Намагання компенсувати втрату ядерної та теплової генерації суто за рахунок гідроресурсів призвело до масштабного екологічного лиха – критичного падіння рівня води в стратегічному високогірному озері Севан, що загрожувало незворотними змінами для всієї екосистеми регіону. Електропостачання кінцевих споживачів у житловому та промисловому секторах у період 1992–1994 років було обмежене до однієї-двох годин на добу, а взимку 1992–1993 років інфраструктура міст зазнала повного колапсу, переводячи систему в режим перманентних каскадних розпадів та багатижневих блекаутів.

Єдиним дієвим механізмом виходу з цього хронічного колапсу та відновлення базової життєздатності держави став примусовий повторний запуск другого енергоблоку Мецаморської АЕС у 1995 році. Це інженерне рішення дозволило миттєво повернути в мережу надійну базову потужність та стабілізувати енергопостачання країни, поклавши край періоду «темних років» [7]. Криза продемонструвала, що в умовах жорсткої паливної ізоляції відновлення великих базових енергооб'єктів є єдино можливим способом повернення системи до стабільного частотного та операційного режиму функціонування, оскільки дрібна або відновлювана генерація на тому етапі розвитку технологій не могла забезпечити системної стійкості [21].

2. Модель воєнного руйнування інфраструктури та ресинхронізації: досвід Балканського регіону (1990-ті – 2000-ні роки).

Аналіз енергетичної кризи у Балканському регіоні, узагальнений у системних оглядах Міжнародного енергетичного агентства та технічних звітах координаційних інструментів європейських операторів [22], демонструє специфіку функціонування енергосистем в умовах масштабного воєнного руйнування мережевої інфраструктури. На відміну від паливних чи ресурсних дефіцитів, криза на Балканах у дев'яностих роках минулого століття мала суто фізичний характер і була викликана цілеспрямованим знищенням ключових елементів магістральних мереж надвисокої напруги.

У ході збройних конфліктів на території колишньої Югославії критичних пошкоджень зазнали стратегічні транзитні лінії електропередачі класу 400 кВ та ключові вузлові підстанції, що забезпечували зв'язок між генерацією та великими центрами споживання. Наслідком цих руйнувань став вимушений поділ раніше єдиного і збалансованого енергопростору на кілька ізольованих енергетичних «островів». Окремі регіони, зокрема Боснія і Герцеговина, Хорватія та Сербія, опинилися в умовах гострого локального дефіциту потужності. Ця ситуація поглиблювалася неможливістю залучення резервів із сусідніх областей, де спостерігався надлишок генерації, але були відсутні технічні канали для її транспортування [8].

Енергосистеми балканських країн тривалий час функціонували в аномальних режимах із низькою надійністю постачання та частими операційними збоями, оскільки локальні оператори були змушені балансувати попит суто за рахунок внутрішніх

обмежених можливостей. Основним та найбільш ефективним механізмом виходу з хронічної кризи стала реалізація масштабної координованої програми відновлення високовольтних коридорів та відбудови зруйнованого підстанційного обладнання. Ключовою інженерною віхою цього процесу стало відновлення транзитної лінії, що дозволило у 2004 році здійснити повну технічну ресинхронізацію балканської мережі з європейським енергетичним об'єднанням UCTE [9].

Цей крок забезпечив відновлення транскордонних перетоків, створив умови для формування спільного регіонального ринку та довів, що відновлення цілісності високовольтної мережі та інтеграція у великі трансприкордонні об'єднання є безальтернативним інструментом ліквідації локальних дефіцитів потужності.

3. Модель інституційного дефіциту та керованих обмежень: досвід Південно-Африканської Республіки (ПАР).

Енергетична криза у Південно-Африканській Республіці, яка триває протягом останніх десятиліть та детально зафіксована у дослідженнях Світового банку, представляє модель хронічного дефіциту генеруючих потужностей у мирний час [10]. На відміну від криз, спричинених зовнішніми геополітичними чинниками або воєнними діями, системний збій у ПАР мав суто внутрішній інституційний характер. Головною передумовою колапсу стало багаторічне недоінвестування у будівництво нових генеруючих об'єктів на тлі стрімкого зростання промислового та побутового попиту, а також неефективне операційне управління державним енергетичним монополістом Eskom.

Основу генерації ПАР традиційно становили гігантські, але технічно застарілі та екологічно неефективні вугільні теплові електростанції. Через хронічне відкладання планових регламентних ремонтів, управлінський хаос та системну корупцію рівень аварійності генеруючого парку компанії Eskom сягнув критичних тридцяти-сорока відсотків. Для запобігання повному розпаду національної мережі та уникнення неконтрольованого загальнодержавного блекауту системний оператор був змушений впровадити жорстко регламентовану систему стабілізаційних обмежень, відому як load shedding [11]. Цей механізм передбачав поділ обмежень на вісім послідовних ступенів, де на найвищих рівнях споживачі залишалися без електропостачання до дванадцяти годин на добу за чітко визначеними циклічними графіками.

Тривала дія цих обмежень змусила уряд ПАР піти на радикальну лібералізацію законодавства та скасувати ліцензування для приватних проектів генерації потужністю до 100 МВт. Це інституційне рішення спровокувало вибуховий, стихійний інвестиційний бум у приватному секторі. Промислові підприємства, об'єкти малого бізнесу та мільйони побутових домогосподарств почали масово розгортати власні дахові сонячні електростанції та інтегрувати літієві системи накопичення енергії для захисту від примусових відключень. Така масштабна prosumer-изація (перехід до активних споживачів) [23] дозволила частково знизити навантаження на державну мережу у денні години, проте призвела до суттєвої деградації класичної фінансової моделі централізованого оператора, який втратив найбільш платоспроможних клієнтів. Досвід ПАР наочно продемонстрував, що тривала неспроможність централізованої системи покривати дефіцит неминуче запускає некеровані процеси автономізації споживачів, які радикально змінюють архітектуру національного енергетичного ринку.

4. Модель тотального інституційного колапсу та хаотичної децентралізації: досвід Лівану.

Енергетичний сценарій Лівану є крайньою точкою деградації централізованої моделі управління, де державний оператор Electricité du Liban (EDL) практично повністю втратив здатність забезпечувати життєдіяльність національної мережі [12]. Коріння ліванського колапсу криється в глибокій макроекономічній кризі, паливній залежності від імпорту та відсутності системних реформ протягом десятиліть. Державні мазутні ТЕС через брак фінансування та неможливість закупівлі палива за заниженими фіксованими тарифами скоротили видачу потужності до критичного мінімуму, забезпечуючи живлення магістральних мереж лише на одну-дві години на добу.

Такий тривалий і глибокий дефіцит призвів до того, що офіційна державна енергосистема фактично перестала виконувати свою базову функцію. Вакуум централізованого постачання був стихійно заповнений неконтрольованим тіньовим ринком приватних дизель-генераторів, які розгорталися на рівні окремих міських кварталів та житлових комплексів. Споживачі опинилися в повній фінансовій та технологічній залежності від локальних приватних операторів, які самостійно прокладали повітряні кабелі та встановлювали тарифи.

Протягом 2022–2025 років висока вартість дизельного палива спровокувала в Лівані масштабний хаотичний «сонячний бум» [13]. Населення та комерційний сектор почали масово монтувати дахові фотоелектричні системи та акумуляторні накопичувачі. Проте через відсутність єдиного технічного нагляду, диспетчерського контролю та стандартів безпеки, ця стихійна децентралізація відбувалася ізольовано. Вона не була інтегрована в єдиний синхронний організм, що остаточно закріпило фрагментацію енергетичного простору країни та призвело до неконтрольованого балансу попиту і пропозиції на мікрорівні.

5. Модель ринкових механізмів та цінового балансування: досвід Європейського Союзу.

Аналіз енергетичної кризи в Європейському Союзі, детально зафіксований у звітах Міжнародного енергетичного агентства, представляє модель

дефіциту, який мав суто ціновий та ресурсний, а не фізичний характер [24]. На відміну від країн, що розвиваються, де мережі зазнавали розпаду або хронічного технічного зносу, європейська криза була спровокована різким скороченням постачання російського природного газу, що призвело до аномального стрибка спотових цін на електроенергію на європейських хабах. Енергосистема ЄС при цьому зберігала абсолютну технічну цілісність, високу маневровість та повний обсяг проектної генерації.

Основним інструментом стабілізації ринку та ліквідації ресурсного дефіциту в країнах ЄС стало масштабне розгортання цифрових інструментів управління попитом (Demand Side Management) та механізмів гнучкого реагування споживачів (Demand Response) [16]. Ринкові регулятори задіяли динамічне ціноутворення, коли інтелектуальні системи обліку (smart meters) автоматично перенаправляли або обмежували споживання великих промислових та побутових об'єктів у години пікових навантажень в обмін на фінансові преференції [17]. Це дозволило здійснити ефективне «зрізання» добових піків (peak shaving) і збалансувати систему без застосування примусових віялових або стабілізаційних відключень споживачів.

Крім того, європейська криза прискорила реалізацію стратегій цифрової трансформації розподільчих мереж (Smart Grid) та інтеграції дахових сонячних електростанцій, які розгорталися планово, під жорстким наглядом системних операторів та з дотриманням суворих стандартів технічної сумісності. Досвід Європейського Союзу довів, що за наявності розвиненої цифрової інфраструктури, інтелектуальних систем обліку та стабільного ринкового середовища, тимчасовий брак потужностей можна успішно нівелювати за рахунок добровільного, фінансово стимульованого коригування поведінки споживачів.

6. Модель сезонного дефіциту та гідроенергетичної залежності: досвід Таджикистану (2000–2020-ті роки).

Аналіз енергетичної парадигми Таджикистану, зафіксований у звітах міжнародних фінансових інституцій та крос-національних енергетичних оглядах, представляє специфічну модель хронічного дефіциту потужностей, зумовленого структурними дисбалансами генерації та критичною залежністю від природно-кліматичних чинників [15]. Енергосистема республіки історично проектувалася з фокусом на гідроенергетику, яка забезпечувала понад дев'яносто п'ять відсотків усього виробництва електроенергії в країні, переважно за рахунок Нурецької ГЕС. Такий однорідний характер генераційного парку сформував глибоку системну вразливість, пов'язану із вираженою сезонністю річкового стоку вахшського басейну.

Суть таджикської енергетичної кризи полягала в гострому циклічному дефіциті потужності, який виникав виключно в осінньо-зимовий період, коли приплив води до водосховищ знижувався до мінімуму, а внутрішній попит на опалення житлового та комунального секторів досягав свого піку. У літні місяці система, навпаки, мала величезні надлишки електроенергії, які скидалися в холосту через відсутність достатніх потужностей експорту після розпаду Об'єднаної енергосистеми Центральної Азії. Протягом майже двох десятиліть уряд країни був змушений запроваджувати жорсткі ліміти енергопостачання для регіонів: сільська місцевість та дрібні міста отримували живлення лише по дві-чотири години на добу, що повністю паралізувало локальний економічний розвиток у зимовий період [14].

Основним інженерно-технічним механізмом подолання цього хронічного дефіциту та диверсифікації генераційного балансу стало паралельне впровадження двох стратегій [15]. По-перше, будівництво масштабної теплової генерації, зокрема вугільної ТЕЦ «Душанбе-2», дозволило створити надійне джерело базової та маневрової потужності в зимовий період, яке не залежало від гідрологічного режиму річок. По-друге, відновлення міждержавних ліній та інтеграція в транскордонні регіональні проекти, такі як CASA-1000, створили умови для комерційного збуту літніх надлишків гідроенергії в обмін на імпортні поставки в періоди зимового дефіциту. Досвід Таджикистану продемонстрував, що за умов однорідної структури генерації подолання дефіциту потребує обов'язкової диверсифікації джерел енергії та розвитку транскордонних інтерконекторів для зовнішнього балансування.

7. Компаративний аналіз світових сценаріїв енергодефіциту та специфіка України.

Для наочності, систематизації та структурування результатів компаративного аналізу зафіксованих міжнародних моделей, у Табл. 1 наведено зведені технічні та інституційні критерії оцінки кризових станів енергетичних систем світу.

Українські реалії демонструють унікальну синергію закордонних кризових чинників, комбінуючи притаманний ПАР бум приватної децентралізації із балканським досвідом динамічного відновлення пошкоджених бойовими діями енергооб'єктів, що розгортається на тлі стихійного насичення ринку побутовими системами накопичення енергії на базі LiFePO4 та Li-ion технологій. На відміну від міжнародних аналогів, системний оператор НЕК «Укренерго» повністю утримує керованість ОЕС і забезпечує у суворій відповідності до стандартів частотного регулювання її стабільну синхронізацію з європейським об'єднанням ENTSO-E. Водночас масштабне залучення приватних хімічних джерел струму в умовах хронічного браку маневрової теплової та гідрогенерації виступає додатковим дестабілізуючим фактором. У моменти відновлення живлення фідерів неконтрольоване підключення мільйонів споживачів провокує

Таблиця 1. Результати порівняння міжнародних моделей енергодефіциту з українськими реаліями

Країна / Регіон	Ключова особливість досвіду	Спільні риси	Відмінні риси
Вірменія	Роль АЕС як фундаменту виживання системи	Визначальна роль ядерної генерації у підтримці «бази» енергосистеми	Україна інтегрована в ENTSO-E (Вірменія була в ізоляції)
Балкани	Відновлення через транскордонні інтерконектори	Пріоритетність міждержавних ліній для залучення аварійної допомоги та імпорту	В Україні руйнування відбуваються динамічно (триваюча війна)
Таджикистан	Ризики гідрозалежності та сезонного дефіциту	Вразливість маневрових ГЕС до зовнішніх чинників (руйнування Каховської ГЕС, обстріли)	В Україні дефіцит спричинений атаками, а не природним маловоддям річок
ПАР (Eskom)	Легалізація приватної мікрогенерації (до 100 МВт)	Масовий перехід бізнесу на власні газові та СЕС як засіб автономізації	Українська система зберігає високу керованість (немає колапсу держоператора)
Ліван	Стихійна децентралізація («паралельна мережа»)	Формування масиву приватних накопичувачів та генераторів на рівні кварталів/будинків	В Україні цілісна ОЕС; децентралізація паралельна з централізованим керуванням
ЄС	Управління попитом (Demand Response) та цифровізація	Прагнення до енергоефективності та впровадження ринкових механізмів гнучкості	В ЄС дефіцит був ціновим/ ресурсним, в Україні – фізичний брак обладнання

виникнення аномальної «зарядної лавини» [20], коли одночасний форсований заряд інверторів накладається на відновлення термодинамічної інерції побутових приладів, викликаючи надвисоку щільність струму та стрімке падіння стохастичності попиту. Як наслідок, графіки обмеження потужності трансформувалися в єдиний доступний метод оперативного управління цим лавиноподібним попитом, за допомогою якого диспетчерський апарат компенсує фізичну відсутність нормативного генеруючого резерву, гарантуючи виконання суворих європейських вимог щодо величини перетоків.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Головна наукова дискусія полягає у фізико-технічній відмінності між класичним (Cold Load Pickup) [18; 19] та виявленим ефектом «зарядної лавини» в ОЕС України [20]. Традиційна теорія CLPU розглядає стрибок потужності відновлення фідерної лінії як процес, обумовлений пусковими струмами двигунів побутової техніки та відновленням її термодинамічного стану за згасаючою експонентою. Натомість математична модель «зарядної лавини» доводить, що масова інтеграція приватних систем накопичення енергії створює аномальне, жорстко фіксоване за величиною активне навантаження тривалістю від 1 до 3 годин. Це пояснюється тим, що контролери інверторів примусово утримують максимальний зарядний струм за алгоритмом Constant Current, піднімаючи груповий коефіцієнт одночасності до граничного значення одиниці. Тривале утримання надпотужності викликає перегрів трансформаторів 10/0,4 кВ та глибокі посадки напруги.

При цьому виявляється ключовий системний парадокс: технічний ризик виникнення «зарядної лавини» в Україні виникає саме через те, що в країні повністю збережено технологічну цілісність магістральних мереж та жорстке централізоване керування НЕК «Укренерго». Якби ОЕС України зазнала хаотичного розпаду на ізольовані райони (за ліванським сценарієм), ефект лавини був би локалізованим та розмитим у часі. Проте централізоване диспетчерське керування графіками погодинних відключень за чіткими чергами викликає зворотний ефект штучної синхронізації стохастичного попиту. Команда на увімкнення черги одночасно подає напругу на кілька фідерів у межах кількох районів. Тисячі приватних інверторів, прив'язаних до цієї черги, запускають свій заряд в одну і ту саму секунду. Таким чином, висока операційна керованість національної енергосистеми стає тригером, який масштабує локальні перехідні процеси окремих СНЕ у потужну загальносистемну «зарядну лавину».

ВИСНОВКИ

Порівняльний аналіз довів, що поточний кризовий стан Об'єднаної енергетичної системи України є унікальним у світовій практиці поєднанням воєнно-технічних чинників Балканського регіону та процесів масової децентралізації Південно-Африканської Республіки. Головна режимна специфіка полягає в необхідності утримання суворих технологічних лімітів частотної стабільності паралельної роботи з європейським інтерконектором ENTSO-E в умовах втрати понад 9 ГВт традиційного маневрового потенціалу.

Описано природу виникнення «зарядної лавини» інверторного обладнання побутових споживачів розподільчих мереж. Встановлено, що на відміну від класичного явища Cold Load Pickup, яке характеризується затухаючим експоненціальним характером, лавиноподібне споживання потужності інверторів

створює тривале (від 1 до 3 годин) активне навантаження. Робота перетворювачів за алгоритмом Constant Current примусово піднімає груповий коефіцієнт одночасності у вузлах до граничних значень одиниці.

Виявлено та сформульовано системний технологічний парадокс ОЕС України: масштабний ризик «зарядної лавини» виникає саме завдяки успішному утриманню цілісності національної мережі та високої операційної дисципліни диспетчерського керування. Централізоване застосування графіків погодинних відключень за чіткими чергами штучно синхронізує стохастичний попит споживачів у часі та просторі. Команда на увімкнення фідерів призводить до одночасного запуску інверторів, перетворюючи локальні перехідні процеси приватних СНЕ на потужний загальносистемний небаланс.

REFERENCES

[1] Energetika Ukrayini vtratila ponad 9 GW potuzhnostej generaciyi vnaslidok rosijskih obstriliv. [Ukraine's energy sector lost over 9 GW of generation capacity due to Russian shelling] URL: https://ua-energy.org/uk/posts/enerhetyka-ukrainy-vtratyla-ponad-9-hvt-potuzhnostei-heneratsii-uriad

[2] Pro zatverdzhennya Instrukciyi pro skladannya i zastosuvannya grafikiv obmezhennya ta avarijnogo vidklyuchennya spozhivachiv elektrichnoyi energiyi: Nakaz Ministerstva energetiki ta vugilnoyi promislovosti Ukrayini vid 23 listopada 2006 r. № 456 (u redakciyi Nakazu Minenergo № 43 vid 13.09.2025). [On approval of the Instructions on the preparation and application of schedules for restriction and emergency shutdown of electricity consumers: Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine dated November 23, 2006 No. 456 (as amended by Order of the Ministry of Energy No. 43 dated September 13, 2025)] URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0151-07#Text

[3] Grushko V. (2022). SINHRONIZACIYa OB'YeDNANOYi ENERGOSISTEMI UKRAYiNI Z ENTSO-E: EKONOMIChNIJ VIMIR. [Hrushko V. (2022). SYNCHRONIZATION OF THE UNITED POWER SYSTEM OF UKRAINE WITH ENTSO-E: ECONOMIC DIMENSION]. Vcheni zapiski Universitetu «KROK», (2(66), 9–16. doi: https://doi.org/10.31732/2663-2209-2022-66-9-16

[4] Trypolska, G. et al. 2024. Organizational and Economic Mechanisms for Promoting Residential Battery Energy Storage Systems in Ukraine. International Journal of Energy Economics and Policy. 14, 6 (Nov. 2024), 501–512. doi: https://doi.org/10.32479/ijeep.16385

[5] Domashni ta biznes-stanciyi perevishuyut potuzhnist AES. [Home and business stations exceed the capacity of nuclear power plants] (In Ukrainian) Available at: https://delo.ua/news/ukrayinci-nakupili-ecoflow-potuznistyu-za-atomnii-reaktor-459632

[6] Sargsyan, Gevorg, Ani Balabanyan, and Denzel Hankinson. 2006. "From Crisis to Stability inthe Armenian Power Sector. Lessons Learned from Armenia's Energy ReformExperience." Working Paper 74, World Bank, Washington, DC. doi: https://doi.org/10.1596/978-0-8213-6589-2

[7] Mkhitaryan L. Energy Sector issues in Armenia: research. URL: https://dspace.aua.am/xmlui/handle/123456789/1323

[8] Rupcic, T. (2024). Navigating the Archives: Writing the History of Development of Electrical Infrastructure in Socialist Yugoslavia (1945-1991). Revue d'Histoire de l'Énergie. doi: https://doi.org/10.3917/jehrhe.012.0170

[9] Ivica Toljan, Eraldo Banovac, and Sejid Tešnjak. 2009. Development of UCTE and reconnection of 1 st and 2nd Pan-European synchronous zones. In Proceedings of the 4th IASME/WSEAS international conference on Energy & environment (EE'09). World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), Stevens Point, Wisconsin, USA, 419–424.

[10] Eskom: The roots of a crisis and avenues forward / L. Baker, J. Burton, C. Godinho, S. Monadjem. Cape Town: University of Cape Town, 2020. 32 p. (Working Paper Series). URL: https://iej.org.za/resource/working-paper/eskom-the-roots-of-a-crisis-and-avenues-forward/.

[11] Naidoo C. (2023) The Impact of Load Shedding on the South Africa Economy. Journal of Public Administration. 58, 1, 7–16. URL: https://journals.co.za/doi/full/10.10520/ejc-jpad_v58_n1_a2

[12] Cut Off From Life Itself»: Lebanon's Failure on the Right to Electricity. Human Rights Watch. 2023. March 9. 127 p. URL: https://www.hrw.org/report/2023/03/09/cut-life-itself/lebanons-failure-right-electricity

[13] Lebanon – Issues Monitor 2024: Commentary. World Energy Council. 2024. June. URL: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Issues_Monitor_2024_Lebanon_commentary.pdf

[14] Tajikistan energy profile. International Energy Agency (IEA). 2022. URL: https://www.iea.org/reports/tajikistan-2022

[15] Poignant A. Electricity and female employment: Evidence from Tajikistan's winter energy crisis. Journal of Development Economics, 172, 103383, 2025, issn 0304-3878, https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2024.103383

[16] Martins, A. G., Neves, L. P., & Sousa, J. L. (2023). Electricity Demand Side Management. Energies, 16(16), 6014. doi: https://doi.org/10.3390/en16166014

[17] Zhou, C. and Zhu, B. and Halff, A. and Davis, S. J. and Liu, Z. and Bowring, S. and Arous, S. B. and Ciais, P. Europe's adaptation to the energy crisis: reshaped gas supply-transmission-consumption structures and driving factors from 2022 to 2024, Earth System Science Data, 17, 2025, 7, 3431-3446, https://doi.org/10.5194/essd-17-3431-2025

[18] Hachmann, C., Becker, H., & Braun, M. (2022). Cold Load Pickup Model Adequacy for Power System Restoration Studies. Energies, 15(20), 7675. doi: https://doi.org/10.3390/en15207675

[19] IEEE PES Power System Relaying and Control Committee, "Cold Load Pickup Issues", IEEE Power & Energy Society, Technical Report PES-TR75, Mar. 2022. URL: https://www.pes-psrc.org/kb/report/075.pdf

[20] Strunkin G. M. “Fenomen zaryadnoyi lavini” v umovah stabilizacijnih vidklyuchen [“Charging avalanche phenomenon” in conditions of stabilization shutdowns]. Tehnichni nauki ta tehnologiyi, 2026. № 2(44). S. 459-465. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-459-465

[21] Balabanyan, Ani, Arthur Kochnakyan, Gevorg Sargsyan, Denzel Hankinson, and Lauren Pierce, “Charged decisions: Difficult choices in Armenia’s energy sector.” The World Bank, (2011). URL: https://old.r2e2.am/wp-content/uploads/2017/01/Charged-DecisionsDifficult-Choices-in-Armenias-Energy-Sector.pdf

[22] IEA welcomes steps toward reform and integration in the Western Balkans and calls for strengthened institutions, policies and implementation. URL: https://www.iea.org/news/iea-welcomes-steps-toward-reform-and-integration-in-the-western-balkans-and-calls-for-strengthened-institutions-policies-and-implementation

[23] Espe, E., Potdar, V., & Chang, E. (2018). Prosumer Communities and Relationships in Smart Grids: A Literature Review, Evolution and Future Directions. Energies, 11(10), 2528. https://doi.org/10.3390/en11102528

[24] Europe’s energy crisis: What factors drove the record fall in natural gas demand in 2022? URL: https://www.iea.org/commentaries/europes-energy-crisis-what-factors-drove-the-record-fall-in-natural-gas-demand-in-2022

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Енергетика України втратила понад 9 ГВт потужностей генерації внаслідок російських обстрілів. URL: https://ua-energy.org/uk/posts/enerhetyka-ukrainy-vtratyla-ponad-9-hvt-potuzhnostei-heneratsii-uriad

[2] Про затвердження Інструкції про складання і застосування графіків обмеження та аварійного відключення споживачів електричної енергії: Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 23 листопада 2006 р. № 456 (у редакції Наказу Міненерго № 43 від 13.09.2025). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0151-07#Text

[3] Грушко В. (2022). СИНХРОНІЗАЦІЯ ОБ’ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ З ENTSO-E: ЕКОНОМІЧНИЙ ВИМІР. Вчені записки Університету «КРОК», (2(66), 9–16. doi: https://doi.org/10.31732/2663-2209-2022-66-9-16

[4] Trypolska, G. et al. 2024. Organizational and Economic Mechanisms for Promoting Residential Battery Energy Storage Systems in Ukraine. International Journal of Energy Economics and Policy. 14, 6 (Nov. 2024), 501–512. doi: https://doi.org/10.32479/ijeep.16385

[5] Домашні та бізнес-станції перевищують потужність АЕС. URL: https://delo.ua/news/ukrayinci-nakupili-ecoflow-potuznistyu-za-atomnii-reaktor-459632/

[6] Sargsyan, Gevorg, Ani Balabanyan, and Denzel Hankinson. 2006. “From Crisis to Stability inthe Armenian Power Sector. Lessons Learned from Armenia’s Energy ReformExperience.” Working Paper 74, World Bank, Washington, DC. doi: https://doi.org/10.1596/978-0-8213-6589-2

[7] Mkhitaryan L. Energy Sector issues in Armenia: research. URL: https://dspace.aua.am/xmlui/handle/123456789/1323

[8] Rupcic, T. (2024). Navigating the Archives: Writing the History of Development of Electrical Infrastructure in Socialist Yugoslavia (1945-1991). Revue d’Histoire de l’Énergie. doi: https://doi.org/10.3917/jehrhe.012.0170

[9] Ivica Toljan, Eraldo Banovac, and Sejid Tešnjak. 2009. Development of UCTE and reconnection of 1 st and 2nd Pan-European synchronous zones. In Proceedings of the 4th IASME/WSEAS international conference on Energy & environment (EE’09). World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), Stevens Point, Wisconsin, USA, 419–424.

[10] Eskom: The roots of a crisis and avenues forward / L. Baker, J. Burton, C. Godinho, S. Monadjem. Cape Town: University of Cape Town, 2020. 32 p. (Working Paper Series). URL: https://iej.org.za/resource/working-paper/eskom-the-roots-of-a-crisis-and-avenues-forward/

[11] Naidoo C. (2023) The Impact of Load Shedding on the South Africa Economy. Journal of Public Administration. 58, 1, 7–16. URL: https://journals.co.za/doi/full/10.10520/ejc-jpad_v58_n1_a2

[12] Cut Off From Life Itself»: Lebanon’s Failure on the Right to Electricity. Human Rights Watch. 2023. March 9. 127 p. URL: https://www.hrw.org/report/2023/03/09/cut-life-itself/lebanons-failure-right-electricity

[13] Lebanon – Issues Monitor 2024: Commentary. World Energy Council. 2024. June. URL: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Issues_Monitor_2024_Lebanon_commentary.pdf

[14] Tajikistan energy profile. International Energy Agency (IEA). 2022. URL: https://www.iea.org/reports/tajikistan-2022

[15] Poignant A. Electricity and female employment: Evidence from Tajikistan’s winter energy crisis. Journal of Development Economics, 172, 103383, 2025, issn 0304-3878, https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2024.103383

[16] Martins, A. G., Neves, L. P., & Sousa, J. L. (2023). Electricity Demand Side Management. Energies, 16(16), 6014. doi: https://doi.org/10.3390/en16166014

[17] Zhou, C. and Zhu, B. and Halff, A. and Davis, S. J. and Liu, Z. and Bowring, S. and Arous, S. B. and Ciais, P. Europe’s adaptation to the energy crisis: reshaped gas supply-transmission-consumption structures and driving factors from 2022 to 2024, Earth System Science Data, 17, 2025, 7, 3431-3446, https://doi.org/10.5194/essd-17-3431-2025

[18] Hachmann, C., Becker, H., & Braun, M. (2022). Cold Load Pickup Model Adequacy for Power System Restoration Studies. Energies, 15(20), 7675. doi: https://doi.org/10.3390/en15207675

[19] IEEE PES Power System Relaying and Control Committee, “Cold Load Pickup Issues”, IEEE Power & Energy Society, Technical Report PES-TR75, Mar. 2022. URL: https://www.pes-psrc.org/kb/report/075.pdf

[20] Стрункін Г.М. «Феномен зарядної лавини» в умовах стабілізаційних відключень. Технічні науки та технології, 2026. № 2(44). С. 459-465. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-459-465

[21] Balabanyan, Ani, Arthur Kochnakyan, Gevorg Sargsyan, Denzel Hankinson, and Lauren Pierce, “Charged decisions: Difficult choices in Armenia’s energy sector”. The World Bank, (2011). URL: https://old.r2e2.am/wp-content/uploads/2017/01/Charged-DecisionsDifficult-Choices-in-Armenias-Energy-Sector.pdf

[22] IEA welcomes steps toward reform and integration in the Western Balkans and calls for strengthened institutions, policies and implementation. URL: https://www.iea.org/news/iea-welcomes-steps-toward-reform-and-integration-in-the-western-balkans-and-calls-for-strengthened-institutions-policies-and-implementation

[23] Espe, E., Potdar, V., & Chang, E. (2018). Prosumer Communities and Relationships in Smart Grids: A Literature Review, Evolution and Future Directions. Energies, 11(10), 2528. https://doi.org/10.3390/en11102528

[24] Europe’s energy crisis: What factors drove the record fall in natural gas demand in 2022? URL: https://www.iea.org/commentaries/europes-energy-crisis-what-factors-drove-the-record-fall-in-natural-gas-demand-in-2022

© Стрункін Г. М.
Дата першого надходження статті до видання: 26.06.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.07.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)