УДК 621.311.1

Г. М. Стрункін

ОБҐРУНТУВАННЯ ГІПОТЕЗИ ПОЗИТИВНОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТРИВАЛІСТЮ ПОГОДИННИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ ТА ПАРАМЕТРАМИ «ЗАРЯДНОЇ ЛАВИНИ»

Метою роботи є наукове обґрунтування, математична формалізація та аналіз механізмів виникнення стійкого позитивного зворотного зв'язку між тривалістю регулярних обмежень електропостачання та результуючими параметрами аномального пікового навантаження, визначеного як «зарядна лавина». В умовах системного дефіциту маневрової генерації в Об'єднаній енергетичній системі України та масової стихійної автономізації побутового сектора класичні підходи до оцінювання процесів відновлення навантаження втрачають адекватність, що вимагає розробки нових теоретичних моделей. Методологія дослідження базується на системному аналізі процесів примусової синхронізації споживання. Застосовано методи теорії автоматичного керування для опису дестабілізуючих замкнених контурів, а також функціональне моделювання залежностей амплітуди та тривалості навантаження від рівня інтегральної оснащеності мережі акумуляторними батареями.

Основні результати. У роботі вперше формалізовано закономірності функціонування двох паралельних контурів дестабілізації розподільчих електричних мереж. Короткостроковий технічний контур описує процеси часової компресії енергодефіциту, що призводять до перевищення уставок релейного захисту або хронічного недозаряду систем автономії в межах декількох послідовних циклів обмежень. Довгостроковий структурний контур відображає трансформацію поведінки споживачів, де перманентні відключення виступають стимулом для значного нарощування сумарної потужності зарядних пристроїв. Доведено, що взаємодія цих контурів замикає петлю позитивного зворотного зв'язку, де вимушене подовження графіків обмежень призводить до нелінійного посилення параметрів «зарядної лавини», викликаючи подальшу деградацію стійкості та керованості розподільчих електричних мереж. Обґрунтовано необхідність переходу до ймовірнісних моделей та цифрових методів керування гнучкістю попиту.

Ключові слова: *«зарядна лавина», графік погодинних відключень, позитивний зворотний зв'язок, системи накопичення енергії.*

Вступ

Масовані удари по об'єктах енергетичної інфраструктури протягом 2022 – 2026 років, які призвели до втрати понад 9 ГВт потужностей теплових та гідроелектростанцій, докорінно змінили умови функціонування Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України [1]. Через руйнування ТЕС та ГЕС, які історично виконували функцію частотного регулювання та покриття добових коливань попиту, виник критичний структурний дефіцит гнучкості. За наявності базової атомної генерації, ОЕС втратила оперативну здатність до балансування, що змусило НЕК «Укренерго» перевести графіки погодинних відключень (ГПВ) із розряду засобів аварійного реагування у статус регулярного механізму примусового маневрування попитом [2, 3].

Системний і регулярний характер застосування ГПВ спровокував стихійну автономізацію побутового сектора, де споживачі почали масово впроваджувати системи накопичення енергії (СНЕ) на базі літій-залізо-фосфатних та літій-іонних акумуляторів [4]. Сумарна встановлена потужність зарядних пристроїв, викуплена побутовим сектором на початок 2026 року, досягла 1,6 ГВт, що є співмірним із потужністю великого ядерного реактора [5]. Цей фактор радикально змінив профіль споживання і зумовив суттєву трансформацію класичних процесів відновлення навантаження, відомих у світовій практиці як Cold Load Pickup (CLPU) [6, 7].

У світовій науковій практиці явище стрибкоподібного зростання навантаження після

тривалого знеструмлення ідентифікується як CLPU. Дослідження K.P. Schneider [8] та C. Hachmann [9] визначають CLPU як складний перехідний процес, що характеризується сукупністю пускових струмів та втратою природної розсинхронізації термостатичних приладів. Для деталізації механізмів CLPU особливе значення мають наукові доробки S. Ihara [10], який у своїх роботах формалізував модель «втрати різночасовості», довівши, що чим довше триває пауза в електропостачанні, тим більше споживачів переходять у стан «увімкнено». Це призводить до зростання групового коефіцієнта одночасності до одиниці. Також у цих працях було закладено основи математичного опису CLPU через розподіл навантаження на інерційне (термостатичне) та неінерційне. Дослідження E. Agneholm [11] щодо системного впливу CLPU на релейний захист та автоматику підтверджують ризик каскадних відключень через хибне спрацювання захисту при масовому ввімкненні навантаження.

Проте сучасна вітчизняна ситуація суттєво доповнює класичні моделі CLPU. Традиційний CLPU зазвичай розглядається як наслідок аварійних подій, що трапляються рідко. У випадку ж регулярних обмежень в ОЕС України енергосистема стикається з циклічним CLPU, посиленим фактором детермінованого заряду сучасних СНЕ. Наявність у споживачів інтелектуальних інверторів, алгоритмічно налаштованих на негайне споживання максимального зарядного струму, формує тривале плато високої потужності, величина і тривалість якого залежать від глибини розряду акумуляторних батарей та відсотку оснащеності домогосподарств ними. Цей пролонгований характер пікового режиму та кумулятивний ефект одночасної компенсації деградації теплової і хімічної інерції споживчого вузла докорінно трансформують класичний CLPU в аномальний режим «зарядної лавини» [12], параметри якого невпинно змінюються внаслідок зростання відсотку оснащеності СНЕ.

Метою роботи є обґрунтування та аналіз механізмів виникнення стійкого позитивного зворотного зв'язку між тривалістю регулярних відключень електропостачання та результуючими параметрами «зарядної лавини».

Формалізація режиму «зарядної лавини» як базисного елемента позитивного зворотного зв'язку

На основі аналізу процесів примусової синхронізації споживання та деградації енергетичної інерції споживчих вузлів виникає необхідність введення єдиної термінології та математичного опису явищ, що відбуваються в розподільчих електричних мережах під час відновлення живлення. Для ідентифікації та дослідження зазначених режимів пропонується введення поняття «зарядна лавина» [12].

«Зарядна лавина» – це режим функціонування ділянки енергосистеми після відновлення електропостачання, за якого відбувається короткочасне, але масоване перевищення фактичної споживчої потужності над розрахунковою. Феномен зумовлений поєднанням двох одночасних факторів: виходом інерційних неелектричних накопичувачів (теплових та холодових) на номінальну потужність для компенсації температурного дрейфу та форсованим зарядом хімічних джерел енергії (акумуляторних систем) при груповому коефіцієнті одночасності, що прямує до одиниці $K_O \to 1$.

Ключовою ознакою «зарядної лавини» є повна деградація стохастичності споживання. У нормальних умовах функціонування житлового сектора коефіцієнт одночасності розраховується за імовірнісними моделями і становить $K_O = 0{,}15...0{,}3$. Під час розвитку «зарядної лавини» відбувається фазова синхронізація обладнання, що математично виражається через перехід системи від імовірнісного стану до квазідетермінованого $K_O \to 1$ за двома складовими:

1. Для інерційних накопичувачів (водонагрівачів, холодильного обладнання) коефіцієнт одночасності зростає до межі 0,8…1,0, оскільки температурний дрейф за час тривалості вимкнення виводить усі пристрої з режиму термостатування в режим безперервного

споживання енергії.

2. Для акумуляторних потужностей коефіцієнт одночасності стає детермінованою величиною, близькою до одиниці $K_O \to 1$, через алгоритмічну налаштованість гібридних інверторів на негайний початок циклу заряду максимальним струмом при появі напруги.

Процес «зарядної лавини» можна описати двома показниками:

1. Амплітуда «зарядної лавини» A_l відображає миттєвий пік споживання у вузлі в момент відновлення живлення. Вона визначається ступенем синхронізації приладів та сумарною встановленою потужністю зарядних пристроїв СНЕ. Ключовим технічним ризиком високої амплітуди є перевищення уставок релейного захисту та автоматики A_{set}, що призводить до негайних каскадних відключень фідерів.

2. Тривалість «зарядної лавини» T_l описує часовий інтервал, протягом якого сукупне навантаження на вузол суттєво перевищує номінально допустимі межі. Для інерційних накопичувачів тривалість визначається швидкістю відновлення температурного градієнта до цільових значень. Для акумуляторних систем тривалість має пряму залежність від експозиції дефіциту t_{off}. Оскільки акумулятори мають фіксовану ємність, чим довше тривало відключення, тим більший обсяг енергії необхідно компенсувати для відновлення автономності.

Критичне значення для збереження стійкості мережі має співвідношення тривалості лавини T_l та часу наявності напруги за графіком обмежень t_{on}. У випадку, коли виконується умова:

$$T_l > t_{on} \tag{1}$$

система переходить у стан перманентного перевантаження, оскільки накопичувачі не встигають відновити ресурс до початку наступного циклу відключень.

Математично амплітуду та тривалість «зарядної лавини» можна представити як функціональні залежності від трьох основних аргументів, що мають пряму кореляцію з результуючими параметрами:

$$A_l = f\left(t_{off}, N(\%), P_{ch}\right), \tag{2}$$

$$T_l = f\left(t_{off}, N(\%), P_{ch}\right), \tag{3}$$

де t_{off} – експозиція дефіциту (час відсутності енергопостачання); $N(\%)$ – інтегральний показник, що відображає відсоток оснащеності споживачів хімічними накопичувачами енергії; P_{ch} – ліміт зарядної потужності, яку розподільча мережа здатна виділити на зарядку акумуляторів та відновлення потенціалу інерційних елементів вузла. При цьому величина P_{ch} обмежена технічним лімітом потужності для цього вузла P_{lim}.

Час доби та пора року також впливають на параметри «зарядної лавини». У класичних дослідженнях явища CLPU [8 – 10] досліджено вплив цих параметрів на час відновлення базового споживання. Однак головна **мета статті** – показати механізм виникнення позитивного зворотного зв'язку. Погода та години доби лише змінюють параметри «зарядної лавини», але вони не описують процес утворення замкненого кола.

Концепція позитивного зворотного зв'язку між тривалістю відключень та параметрами «зарядної лавини»

Регулярне застосування графіків погодинних відключень не є лінійним інструментом пропорційного зниження навантаження. Навпаки, між експозицією дефіциту енергопостачання та результуючими параметрами «зарядної лавини» виникає стійка система зв'язків, яка за своїми властивостями відповідає механізму позитивного зворотного зв’язку. Розвиток цієї дестабілізуючої петлі відбувається через паралельне функціонування двох контурів: короткострокового технічного та довгострокового структурного.

Короткостроковий технічний контур замикається безпосередньо в межах одного або декількох послідовних циклів обмежень і зумовлений процесами часової компресії. За збільшення тривалості знеструмлення зростає глибина розряду автономних систем накопичення енергії та ступінь деградації теплової інерції споживчого вузла. У момент подачі напруги весь накопичений енергодефіцит за час відключення t_{off} (попит) намагається реалізуватися протягом обмеженого часового інтервалу живлення. Аналітично алгоритм розвитку причинно-наслідкових зв'язків технічного контуру в момент увімкнення напруги описується такою послідовністю:

$$\uparrow t_{off} \Rightarrow \uparrow nonum \Rightarrow \uparrow N(\%) \Rightarrow \uparrow P_{ch} \Rightarrow \uparrow A_l \Rightarrow A_l > A_{set} \Rightarrow \uparrow t_{off}. \quad (4)$$

Зростання цієї потреби за умови фазової синхронізації споживачів призводить до того, що інтегральний рівень оснащеності накопичувачами $N(\%)$ та виділена зарядна потужність P_{ch} різко збільшує амплітуду лавини A_l. При досягненні умови, коли амплітуда перевищує уставки релейного захисту та автоматики A_{set}, відбувається негайне каскадне вимкнення фідерної лінії. Це призводить до вимушеного збільшення фактичного часу відсутності напруги, що додатково поглиблює дефіцит і при наступній спробі ввімкнення генерує ще більшу амплітуду лавини.

Друга складова технічного контуру визначає часову втрату стійкості, коли тривалість лавини через значний накопичений попит перевищує відведене графіком вікно наявності живлення t_{on}:

$$\uparrow t_{off} \Rightarrow \uparrow nonum \Rightarrow \uparrow N(\%) \Rightarrow \downarrow P_{ch} \Rightarrow \uparrow T_l \Rightarrow T_l \geq t_{on} \Rightarrow \uparrow t_{off}. \quad (5)$$

За умови $T_l > t_{on}$, яке може виникнути при обмежені зарядної потужності P_{ch}, обладнання переходить у стан хронічного недозаряду. Споживачі зустрічають наступний цикл обмежень із частково виснаженими накопичувачами, що еквівалентно збільшенню t_{off}.

Довгостроковий структурний контур дестабілізації описує трансформацію системи через зміну поведінки споживача. Перманентний дефіцит маневрової генерації та висока тривалість відключень діють як економічний та психологічний стимул для побутового сектора. Прагнучи забезпечити життєдіяльність, населення інвестує в автономну інфраструктуру, що веде до безперервного зростання інтегрального рівня оснащеності хімічними накопичувачами $N(\%)$. Збільшення показника $N(\%)$ означає, що у кожному споживчому вузлі фундаментально зростає сумарна встановлена потужність зарядних пристроїв. Отже, за однакової тривалості відключення кожне наступне відновлення живлення супроводжується значно вищим рівнем синхронізованого зарядного струму. Це призводить до подальшого зростання амплітуди лавини та подовження плато її тривалості. Оператори системи розподілу, фіксуючи критичні перевантаження трансформаторів та ліній, змушені штучно подовжувати тривалість відключень t_{off} або дрібнити графіки, щоб зменшити одночасний наплив потужності. Таким чином, замикається дестабілізуюча петля позитивного зворотного зв'язку: збільшення тривалості відключень через проміжні етапи технічного перевантаження та структурного насичення мережі автономними приладами призводить до значного посилення параметрів «зарядної лавини». Це, у свою чергу, руйнує стійкість розподільчих мереж і змушує операторів ще більше подовжувати час знеструмлення фідерів.

Структуру виникнення двох контурів стійкого позитивного зворотного зв’язку в системі за наявності ГПВ наведено на рис. 1.

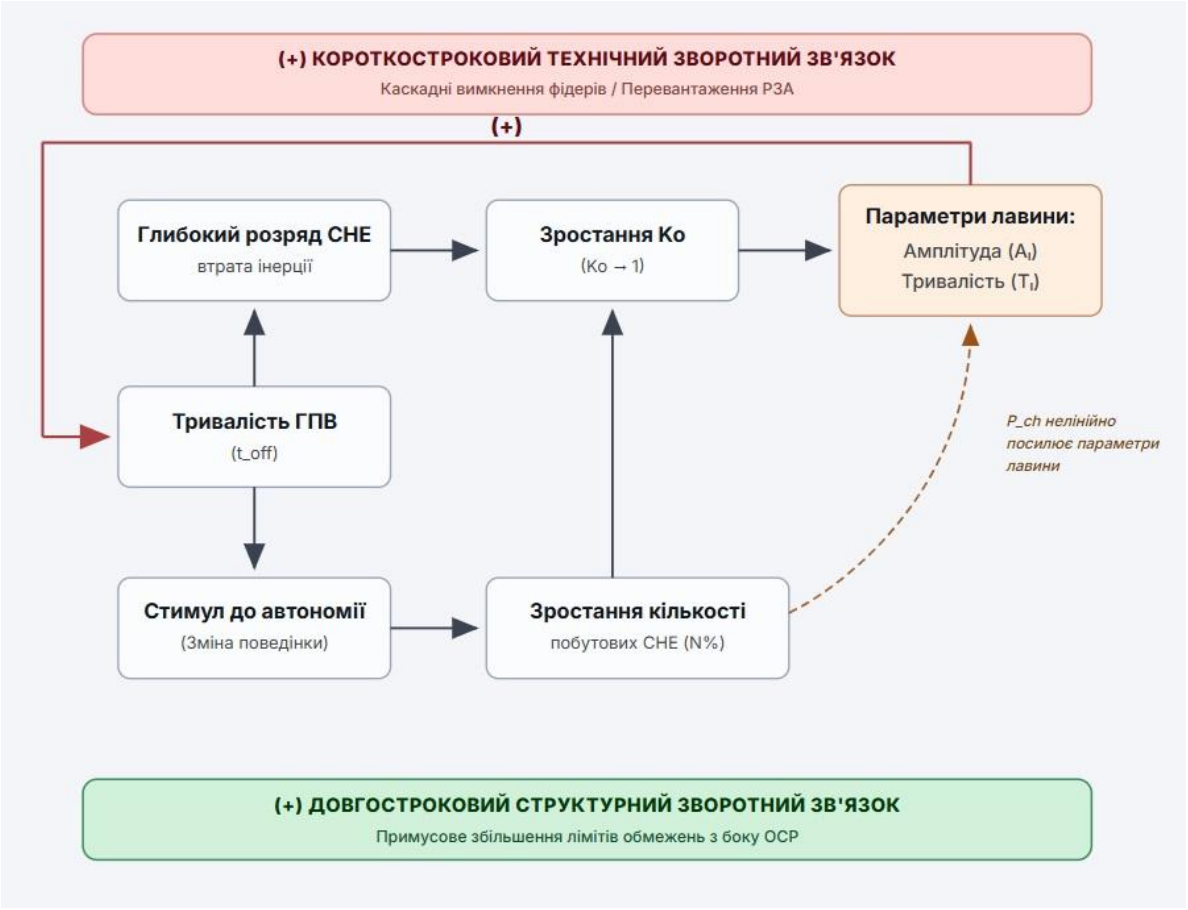


Рис. 1. Структурна схема дестабілізуючих контурів позитивного зворотного зв'язку в розподільчих мережах при застосуванні ГПВ

Відсоток оснащеності домогосподарств СНЕ має експоненційний характер зростання [13], а знаходження кривої попиту на початковій крутій ділянці дозволяє прогнозувати стрімку зміну профілю побутового навантаження.

Обґрунтована концепція позитивного зворотного зв'язку та виявлені закономірності деградації стохастичності споживання вказують на неможливість стабілізації розподільчих мереж класичними детермінованими методами. Перспективи подолання системної кризи енергодефіциту полягають у переході від пасивного обмеження навантаження до активного цифрового керування гнучкістю споживчих вузлів. Зважаючи на багатофакторність і випадковий характер індивідуального розряду та заряду автономних пристроїв, виникає потреба у розробці ймовірнісних моделей «зарядної лавини», які дозволять прогнозувати динаміку сукупного попиту на основі статистичних даних про місткість акумуляторного парку та поведінкові фактори споживачів.

Оскільки система «генерація–мережа–споживач» за наявності масових джерел автономного живлення починає функціонувати як замкнена система з вираженими дестабілізуючими петлями, її дослідження має здійснюватися методами теорії автоматичного керування. Застосування її математичного апарату, зокрема аналізу передавальних функцій та критеріїв стійкості частотних характеристик, дозволить визначити граничні умови, за яких система зберігає керованість. Це закладе теоретичне підґрунтя для синтезу алгоритмів інтелектуального керування попитом та створення адаптивних систем захисту, здатних динамічно демпфувати петлі позитивного зворотного зв'язку.

Експериментальна перевірка теоретичних положень

Для чисельного підтвердження впливу позитивного зворотного зв’язку проведено натурне дослідження на базі газифікованого 5-поверхового 60-квартирного будинку (оснащеність

бойлерами становить приблизно 30 %). Низька теплова інерція об'єкта дозволила зафіксувати чисті параметри «зарядної лавини», викликаної оснащенням побутовими СНЕ. Запис активної потужності виконувався трифазним лічильником НІК 2303 (крок – 1 хв) після 5-годинної паузи ГПВ t_{off} та перераховано у відносні одиниці (в. о.). Базове навантаження становило 1,0 в.о. виміряно за відсутності дії ГПВ і становило для аналогічних умов 15,2 кВт. За опитуваннями, $N(\%) = 16,7\%$ (10 квартир з 60).

Криву активної потужності при стихійній «зарядній лавині» наведено на рис. 2.

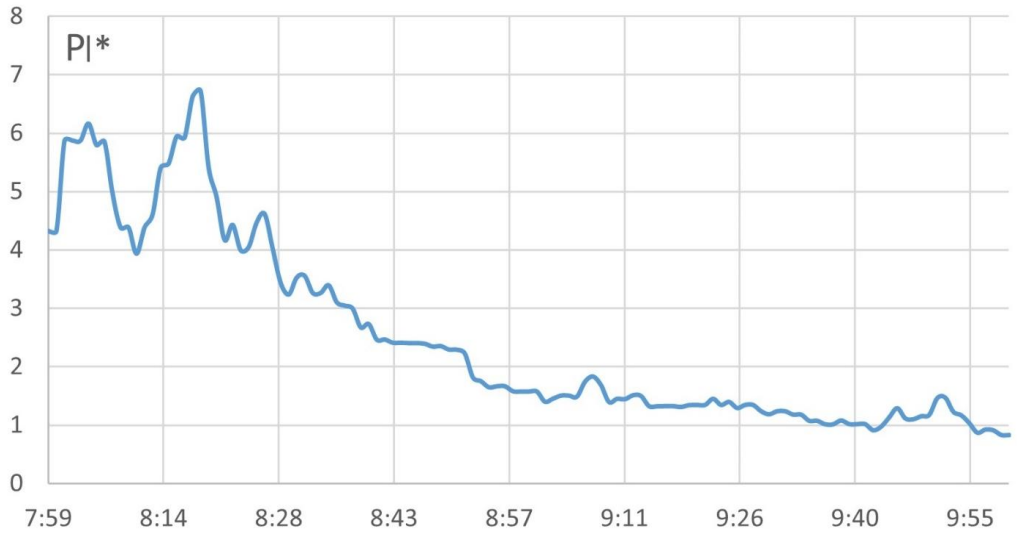


Рис. 2. Крива активної потужності споживчого вузла при «зарядній лавині»

На етапі спаду (приблизно 8:50) зафіксовано маркер структурного зламу – сходинкове скидання потужності з рівня кумулятивного плато (~2,4 в.о.) до пологої траєкторії (~1,7 в.о.). Перепад становить ΔP_{step}=2,4–1,7=0,7 в.о. (10,64 кВт), що відображає масовий перехід інверторів СНЕ із режиму стабілізації струму до стабілізації напруги.

За середньої зарядної потужності одного інвертору P_{inv}=1,0 кВт кількість СНЕ, що працювали одночасно, становить:

$$N = \frac{\Delta P_{step}}{P_{inv}} = \frac{2,4-1,7}{(1/15,2)} \approx 11. \quad (6)$$

Для 60-квартирного будинку поточний відсоток оснащеності СНЕ дорівнює:

$$N(\%) = \frac{11}{60} = 18,33\%, \quad (7)$$

що корегує з результатами опитувань.

Експеримент довів, що наявність навіть такої частки накопичувачів підвищує максимум потужності під час CLPU. Синхронізований імпульс заряду СНЕ накладається на ранковий соціо-поведінковий пік мешканців. Така суперпозиція генерує амплітуду 6,7 в.о. (101,8 кВт), що відповідає струму 162,7 А. Ця обставина вже на поточному етапі впровадження СНЕ призводить до перевищення струмом споживання номінального значення вводного захисту (запобіжник ПН2-160) та створює в перспективі загрозу перевищення його інтегралу плавлення, підтверджуючи дію довгострокового контуру позитивного зворотного зв’язку.

Висновки

У результаті проведеного аналізу процесів трансформації профілю споживання побутовими навантаженнями в умовах застосування графіків погодинних відключень обґрунтовано концепцію формування позитивного зворотного зв'язку в системі «генерація–мережа–споживач». Виявлено, що подовження часу обмежень запускає два

дестабілізуючі контури. Короткостроковий технічний контур через накопичений попит веде до перевищення уставок релейного захисту та автоматики з наступним каскадним вимкненням або спричиняє хронічний недозаряд систем автономії. Довгостроковий структурний контур через психологічні та комерційні чинники стимулює споживачів нарощувати сумарну ємність і потужність приватних накопичувачів, що значно посилює лавину при кожному наступному циклі увімкнення та змушує операторів ще більше подовжувати час знеструмлення фідерів. Експериментально підтверджено, що навіть за відносно низького рівня дифузії побутових систем накопичення енергії їх навантаження підвищує амплітуду «зарядної лавини», створюючи загрозу спрацювання систем захисту внутрішньобудинкових розподільних пунктів. Наступним кроком повинно стати накопичення статистичних даних ввімкнення побутових СНЕ під час дії ГПВ та розробка математичної моделі, яка допоможе розрахувати точні критерії стійкості мережі та запропонувати алгоритми гнучкого захисту для споживчого вузла із великою кількістю локальних накопичувачів.

СПИСОК 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. (дата доступу 20.05.2026).

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. (дата доступу 20.05.2026).

3. Роз'яснення щодо причин відключень та розподілу електроенергії між областями. URL: https://www.mev.gov.ua/novyna/rozyasnennya-shchodo-prychyn-vidklyuchen-ta-rozpodilu-elektroenerhiyi-mizh-oblastyamy. (дата доступу 20.05.2026).

4. Organizational and Economic Mechanisms for Promoting Residential Battery Energy Storage Systems in Ukraine / G. Trypolska et al. *International Journal of Energy Economics and Policy*. Nov. 2024. Vol. 14, №6. P. 501–512. URL: 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 . (дата доступу 20.05.2026).

6. Friend F. Cold load pickup issues. *2009 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. College Station, TX, USA. 2009. P. 176–187. URL: https://10.1109/CPRE.2009.4982512.

7. A Survey of Cold Load Pickup. Practices / J. Lawhead et al. *Western Protective Relay Conference*. October 25-27, 2005. URL: https://wprcarchives.org/wp-content/uploads/2024/07/Larry-Lawhead_A-Survey-of-Cold-Load-Pickup-Practices_2005.pdf (дата доступу 20.05.2026).

8. Evaluating the Magnitude and Duration of Cold Load Pick-up on Residential Distribution Feeders Using Multi-State Load Models / Kevin P. Schneider et al. *IEEE Transactions on Power Systems*. Sep. 2016. Vol. 31, № 5. URL: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2494882.

9. Hachmann C., Becker H., Braun M. Cold Load Pickup Model Adequacy for Power System Restoration Studies. *Energies*. 2022. № 15 (20). P. 7675. URL: https://doi.org/10.3390/en15207675.

10. Ihara S., Schweppe F. C. Physically Based Modeling of Cold Load Pickup. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100. 1981. P. 4142–4150.

11. Agneholm E. Cold load pick-up of residential load. *IEE Proceedings – Generation. Transmission and Distribution*. 2000. Vol. 147, №1. P. 44–50. URL: https://doi.org/10.1049/IP-GTD:20000058.

12. Стрункін Г. М. Феномен зарядної лавини» в умовах стабілізаційних відключень. *Технічні науки та технології,* 2026. № 2 (44). С. 464–470. URL: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-459-465.

13. Імпорт акумуляторів до України у І кварталі 2026 року зріс у 3,8 раза. URL: https://expertsclub.eu/import-akumulyatoriv-do-ukrayiny-u-i-kvartali-2026-roku-zris-u-38-raza/ (дата доступу 20.05.2026).

Стаття надійшла до редакції 09.07.2026.
Стаття пройшла рецензування 17.07.2026.
Стаття опублікована 30.09.2026.

Стрункін Гліб Миколайович – магістр, інженер, e-mail: strunkingleb@gmail.com ORCID: 0009-0009-1719-4132.
ТОВ «Плутон ІС».