Обґрунтування параметрів резервного енергозабезпечення зарядного вузла підрозділу підвозу електричних транспортних засобів

Substantiation of Backup Power Supply Parameters for the Charging Node of an Electric-Vehicle Supply Unit

Олександр Горошко
ад'юнкт науково-організаційного відділу, e-mail: goroshko22222@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5695-5311

Oleksandr Goroshko
PhD student, Scientific and Organizational Department, e-mail: goroshko22222@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5695-5311

Військова академія, м. Одеса, Україна

Military Academy, Odesa, Ukraine

Received: September 28, 2026 | Revised: October 2, 2026 | Accepted: October 31, 2026

УДК: 629.331, 355.41, 621.311.4

DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.5.41

Мета роботи. Обґрунтувати параметри резервного енергозабезпечення зарядного вузла підрозділу підвозу, оснащеного електричними вантажними автомобілями, за яких підрозділ виконує нормативний добовий обсяг перевезень за характерних режимів обмеження електропостачання.

Метод дослідження. Сценарне розрахункове дослідження добового енергобалансу парку з кроком одна година на горизонті чотирнадцяти діб: аналіз нормативних документів, математичне моделювання, шість режимів обмеження живлення, однофакторний аналіз чутливості та зіставлення двох типів приводу за єдиним показником спроможності.

Результати дослідження. Вимога до резерву є двоскладовою: за половинної потужності установки задача не має розв'язку за жодного обсягу палива. Для умовного парку з шести машин потрібний обсяг становить 387 л за повного технічного стану батарей і 422 л за граничного. Отримано замкнену умову допустимості, що пов'язує плановий добовий пробіг, питому витрату енергії та технічний стан батарей і визначає область розв'язності задачі.

Теоретична цінність дослідження Енергетичну стійкість подано через спроможність підрозділу, що поширює її оцінювання зі стаціонарних об'єктів на транспортні підрозділи.

Практична цінність дослідження. Результати придатні для формування вимог до зарядної інфраструктури та резервних джерел живлення під час переоснащення підрозділів підвозу.

Оригінальність дослідження. Поєднано погодинний енергобаланс зарядного вузла, деградацію тягових батарей і критерій збереження транспортної спроможності.

Обмеження та подальші дослідження. Результати мають модельний характер і отримані для умовного парку; наведені обсяги є розрахунковим мінімумом, а не нормою забезпечення.

Тип статті: Дослідницька стаття.

Purpose. To substantiate the parameters of the backup power supply for the charging station of a logistics transport unit equipped with electric trucks, ensuring that the unit can fulfil its prescribed daily transportation workload under representative electricity supply restriction scenarios.

Method. A scenario-based computational study of the fleet's daily energy balance, using one-hour time steps over a fourteen-day period. The methods included regulatory document analysis, mathematical modelling, six electricity supply restriction scenarios, one-factor sensitivity analysis, and a comparison of two propulsion types using a common operational capability indicator.

Findings. Backup power requirements comprise two components: generating capacity and fuel reserves. At half the rated generator capacity, no feasible solution exists regardless of the available fuel volume. For a hypothetical fleet of six vehicles, the required fuel reserve is 387 litres at full battery state of health and 422 litres at the minimum considered state of health. A closed-form feasibility condition was derived, linking planned daily mileage, specific energy consumption, and battery state of health to define the feasible solution domain.

Theoretical implications. Energy resilience is assessed in terms of a unit's operational capability, extending resilience assessment from stationary facilities to military transport units.

Practical implications. The findings can support the specification of charging infrastructure and backup power supply requirements when modernising military logistics transport units.

Originality. The study integrates the hourly energy balance of a charging station, traction battery degradation, and a criterion for maintaining transportation capability within a unified analytical framework.

Limitations and future research. The findings are model-based and derived for a hypothetical fleet. The reported fuel reserve volumes represent calculated minimum requirements rather than established logistical supply standards.

Paper type. Research article.

Ключові слова: логістичне забезпечення; електрична вантажівка; резервне джерело живлення; транспортна спроможність; технічний стан тягових батарей.

Key words: logistics support; electric truck; backup power supply; transportation capability; traction battery state of health.

Вступ

Відповідно до Порядку логістичного забезпечення сил оборони [10], логістичне забезпечення ґрунтується, зокрема, на принципах пріоритетності та достатності, що передбачають безперервне й повне задоволення потреб складових сил оборони. На тактичному рівні підвезення матеріально-технічних засобів (МтЗ) визначено одним з основних завдань логістичного забезпечення військової частини, а його несвоєчасне здійснення безпосередньо знижує бойові спроможності підрозділів [1]. Перехід до використання електричних транспортних засобів у системі підвезення розглядається як один із напрямів зниження експлуатаційних витрат, спрощення технічного обслуговування та зменшення залежності від ланцюгів постачання пального [30, 31].

Додатковим чинником є вартість пального. Її зростання зумовлене не лише ринковою кон'юнктурою, а й змінами в нормативно-правовому регулюванні. Зокрема, ставки акцизного податку на пальне, установлені Податковим кодексом України [3], поетапно підвищуються відповідно до змін, унесених у межах імплементації положень законодавства Європейського Союзу [4]. За даними моніторингу середніх цін у мережах автозаправних станцій України, ціна дизельного пального зросла з 61,24 грн/л станом на 24.02.2026 до 98,41 грн/л станом на 24.09.2026, тобто на 60,7 % протягом семи місяців [11]. Для парку транспортних засобів, експлуатація якого залежить від постачання пального, це створює ризик зростання витрат як на перевезення, так і на формування та утримання військових запасів.

Водночас перехід на електричні транспортні засоби не усуває залежності підрозділу від зовнішнього постачання енергоносіїв, а змінює її характер. Замість залежності від підвезення пального виникає залежність від електропостачання пункту базування, який є стаціонарним об'єктом із відомим місцем розташування та обмеженими можливостями для оперативного переміщення. Досвід функціонування енергетичної системи України з 2022 року свідчить про систематичний характер обмежень електропостачання та уражень об'єктів енергетичної інфраструктури [27]. За таких умов залежність від електропостачання стає самостійним чинником ризику зниження транспортної спроможності підрозділів логістичного забезпечення.

Наявні підходи до обґрунтування складу парку транспортних засобів і розміщення зарядної інфраструктури не дають однозначної відповіді на практичне питання: які параметри резервного енергозабезпечення зарядного вузла необхідні для виконання нормативного добового обсягу перевезень за заданих обмежень електропостачання та як потреба в резерві змінюється протягом строку експлуатації тягових акумуляторних батарей.

Зазначена невизначеність має практичні наслідки вже на етапі планування переоснащення підрозділів. Рішення щодо складу парку, потужності приєднання зарядного вузла та параметрів резервного енергозабезпечення приймаються одночасно й розраховуються на тривалий період, тоді як умови електропостачання можуть змінюватися протягом строку експлуатації техніки. Якщо резервне енергозабезпечення розраховано без урахування можливих тривалих обмежень електропостачання, транспортна спроможність підрозділу може знижуватися саме в періоди зростання потреби в підвезенні. Натомість надмірне резервування без належного розрахункового обґрунтування призводить до збільшення вартості облаштування пункту базування, потреби в паливі для резервної установки та обсягу робіт із її технічного обслуговування. Отже, виникає необхідність у методичному підході, який дає змогу обґрунтовано визначати параметри резервного енергозабезпечення залежно від результатів виконання транспортних завдань підрозділу.

Відмінність досліджуваної задачі від типової задачі резервування електропостачання стаціонарного об'єкта зумовлена двома обставинами. По-перше, парк електричних транспортних засобів одночасно є споживачем і накопичувачем енергії. Завдяки енергії, накопиченій у тягових акумуляторних батареях, транспортні засоби здатні певний час

функціонувати після припинення зовнішнього електропостачання. Тому короткочасне знеструмлення не обов'язково спричиняє негайне зниження транспортної спроможності, проте може призводити до формування відкладеного енергетичного дефіциту. По-друге, доступний запас енергії не є сталим, оскільки зменшується внаслідок деградації тягових акумуляторних батарей. Відповідно, той самий зарядний вузол за незмінних параметрів резервного енергозабезпечення може забезпечувати різну тривалість автономного функціонування парку на початку та наприкінці строку експлуатації транспортних засобів. Зазначені особливості не повною мірою відображаються традиційними показниками надійності електропостачання.

Наукова новизна дослідження полягає не в розробленні окремих складників розрахункової схеми, кожен із яких має наукові передумови, а в їх інтеграції для розв'язання задачі обґрунтування параметрів резервного енергозабезпечення. Залежність доступного запасу енергії від деградації тягових акумуляторних батарей встановлено в попередніх дослідженнях [22, 33], а підходи до оцінювання енергетичної стійкості за впливом на виконання завдань запропоновано для стаціонарних військових об'єктів [15, 29]. Авторський внесок полягає в поєднанні трьох складників у єдиній розрахунковій схемі: погодинного енергобалансу зарядного вузла з обмеженим резервом, змінного технічного стану тягових акумуляторних батарей і критерію збереження транспортної спроможності підрозділу. На цій основі отримано замкнену умову допустимості, що пов'язує плановий добовий пробіг, питому витрату енергії та технічний стан батарей і визначає область параметрів, у межах якої задача обґрунтування резерву має розв'язок.

Із попередніх досліджень адаптовано опис деградації ємності тягових акумуляторних батарей через коефіцієнт технічного стану, принцип оцінювання стійкості за результатами виконання завдань та підхід до керування графіком заряджання парку [32]. Авторськими результатами є постановка оберненої задачі визначення необхідного обсягу резерву, отримання умови допустимості (13) та розроблення способу зіставлення транспортних парків з електричним і дизельним приводом за єдиним показником транспортної спроможності без використання непідтверджених вартісних характеристик.

Мета статті. Обґрунтувати параметри резервного енергозабезпечення зарядного вузла підрозділу підвозу системи логістичного забезпечення Збройних Сил України, оснащеного електричними вантажними автомобілями, що забезпечують виконання нормативного добового обсягу перевезень за характерних режимів обмеження електропостачання.

Для досягнення поставленої мети визначено такі **завдання дослідження**:

а) розробити розрахункову схему добового енергобалансу парку електричних транспортних засобів, яка пов'язує параметри енергозабезпечення зарядного вузла з транспортною спроможністю підрозділу;

б) сформувати сукупність характерних сценаріїв обмеження електропостачання та визначити транспортну спроможність парку за кожним із них;

в) установити залежність необхідного обсягу резерву палива для резервної електрогенераторної установки від технічного стану тягових акумуляторних батарей;

г) розробити методичний підхід до зіставлення парків транспортних засобів з електричним і дизельним приводом за єдиним показником транспортної спроможності в умовах симетричних сценаріїв порушення постачання відповідних енергоносіїв.

Огляд літератури

Дослідження, пов'язані з тематикою статті, доцільно систематизувати за п'ятьма основними напрямами.

Електрифікація військового транспорту. Simulcik та ін. [31] розглядають електрифікацію як один із напрямів трансформації оперативного енергозабезпечення

збройних сил, наголошуючи на зростанні потреби в енергетичному забезпеченні бойових дій та вразливості протяжних ланцюгів постачання пального. Економічні аспекти переходу на електричний транспорт досліджено також у сфері цивільних вантажних перевезень. Зокрема, Samet та ін. [30] розрахували приведену вартість перевезень середньо- та великотоннажними електричними вантажівками, а Burke та ін. [16] спрогнозували вартість таких транспортних засобів до 2040 року. Спільною рисою зазначених досліджень є переважне оцінювання економічної ефективності електрифікації за умови стабільного функціонування системи електропостачання.

Стійкість енергопостачання об'єктів. Підходи до оцінювання стійкості енергетичних систем узагальнено в оглядових працях Jasiūnas та ін. [23] і Wang та ін. [34]. У цих дослідженнях показано, що більшість застосовуваних показників характеризують стан системи електропостачання, зокрема тривалість і масштаб порушень, а також обсяг недовідпущеної електричної енергії, проте не відображають безпосереднього впливу таких порушень на результати діяльності споживача. Marqusee і Jenket [25], проаналізувавши два масиви експлуатаційних даних, установили, що поширені показники надійності резервних дизель-генераторних установок не забезпечують достатньої точності прогнозування їхнього функціонування під час тривалого знеструмлення, оскільки не повною мірою враховують імовірність відмов за безперервного режиму роботи. Marqusee та ін. [26] здійснили порівняльне оцінювання гібридної мікромережі, що поєднує фотоелектричну станцію, накопичувач енергії та генераторні установки, із системою енергопостачання, побудованою виключно на дизельних генераторах. За результатами дослідження встановлено вищу стійкість і нижчу вартість життєвого циклу гібридної системи.

Найбільш наближеними до постановки завдань цієї статті є дослідження, у яких стійкість енергозабезпечення військових об'єктів оцінюється за її впливом на виконання визначених завдань, а не лише за технічними показниками електропостачання. Зокрема, Peterson та ін. [29] запропонували оцінювати функціонування мікромережі військового об'єкта з урахуванням її впливу на виконання завдань, а Anuat та ін. [15] поширили такий підхід на порушення ланцюгів постачання енергоносіїв, від яких залежить функціонування резервних джерел живлення. Водночас обидва дослідження зосереджені на стаціонарних об'єктах із заданими графіками енергетичного навантаження. На відміну від них, парк електричних транспортних засобів одночасно є споживачем і накопичувачем енергії, доступний запас якої змінюється залежно від технічного стану та напрацювання тягових акумуляторних батарей.

Парк електричних транспортних засобів у системі енергопостачання. Song та ін. [32] установили, що оптимізація графіків заряджання парку середньо- та великотоннажних електричних вантажівок у депо дає змогу істотно зменшити пікове навантаження на електричну мережу та витрати на електроенергію без зміни кількісного складу парку. Liu та ін. [24] дослідили можливості використання електричних транспортних засобів як резервних джерел електропостачання під час знеструмлення, розглядаючи транспортний парк не лише як споживача, а й як складник забезпечення енергетичної стійкості. Проте в обох дослідженнях основну увагу приділено економічним показникам або навантаженню на електромережу, а не здатності транспортного парку виконувати визначений обсяг перевезень. Du та ін. [18] показали, що під час планування зарядної інфраструктури визначальними чинниками є обмеження її пропускної здатності та поточний рівень заряду тягових батарей. Водночас доступність зовнішнього електропостачання розглядається як задана умова.

Окремий напрям становлять дослідження стійкості вантажних перевезень. Patnala та ін. [28] на основі огляду 149 наукових праць систематизували показники стійкості транспортних систем до деструктивних впливів і встановили, що переважна більшість із них характеризується порушенням функціонування транспортної мережі. Водночас порушення

енергозабезпечення транспортного парку як самостійний чинник, що знижує його спроможність, у зазначеній системі показників окремо не розглядається.

Досвід логістичного забезпечення в умовах воєнного стану. Саган та ін. [12] узагальнили досвід організації логістичного забезпечення прикордонного загону, який виконує завдання у складі оперативно-тактичного угруповання Збройних Сил України. Зокрема, розглянуто організацію постачання матеріально-технічних засобів за класами I–V, ешелонування запасів пально-мастильних матеріалів та їх розосередження на польових складах для зниження вразливості до ударів противника. Характерно, що заходи із захисту запасів енергоносіїв у цьому та подібних дослідженнях стосуються переважно пального, тоді як питання енергетичної стійкості транспортних засобів з електричним приводом залишаються поза межами розгляду.

Шаповалов та ін. [13] запропонували підхід до оцінювання ефективності військових перевезень у системі логістичного забезпечення на основі комплексного показника. Гудімов і Максименков [8] дослідили особливості транспортно-логістичного забезпечення Збройних Сил України та інших військових формувань під час бойових дій. Гибало [5] узагальнив досвід, основні виклики та напрями вдосконалення логістичного забезпечення угруповань військ (сил) упродовж 2014–2025 років, зокрема, перехід до розосередженого зберігання запасів і застосування децентралізованих способів доставляння матеріально-технічних засобів. У зазначених працях основним енергоносієм транспортних засобів залишається пальне, а відновлення його запасів забезпечується шляхом підвезення відповідних матеріальних засобів. Натомість стійкість енергозабезпечення транспортних засобів з електричним приводом, для яких поповнення запасу енергії залежить від працездатності зарядного вузла, окремо не досліджується.

Власні попередні результати. У попередніх працях автора визначено витрати енергоресурсів на підготовку військових водіїв із використанням транспортних засобів з електричним і дизельним приводом, а також оцінено потенціал сонячного енергозабезпечення парку електромобілів [6]. Крім того, здійснено просторове планування мережі зарядних хабів для важких електричних вантажівок та оцінено перспективи її використання в системі логістичного забезпечення Збройних Сил України [7]. У зазначених дослідженнях обґрунтовано енергетичні потреби транспортного парку та раціональне розміщення зарядних станцій. Проте електропостачання розглядалося як безперервне: передбачалося, що зарядний вузол буде доступний у момент прибуття транспортного засобу, а обмеження визначалися переважно його пропускною здатністю. У цій статті зазначене припущення переглянуто з урахуванням можливого припинення зовнішнього електропостачання та обмеженого запасу палива резервної електрогенераторної установки.

Невирішена частина проблеми. У наявних дослідженнях стійкості енергопостачання основну увагу приділено показникам надійності електропостачання, тоді як їхній взаємозв’язок із результатами виконання завдань транспортними підрозділами досліджено недостатньо. Зокрема, у системі логістичного забезпечення Збройних Сил України потребують подальшого наукового обґрунтування питання визначення залежності транспортної спроможності підрозділу підвозу від параметрів резервного енергозабезпечення зарядного вузла, а також урахування деградації тягових акумуляторних батарей під час визначення необхідного обсягу енергетичного резерву.

Окремої уваги потребує нормативний аспект проблеми. Бойовий статут [1] визначає живучість і стійкість системи логістичного забезпечення як обов’язкові вимоги та пов’язує їх забезпечення, зокрема, з наявністю встановлених норм військових запасів матеріально-технічних засобів. Водночас чинна класифікація матеріально-технічних засобів за класами постачання не передбачає електричну енергію як окремий енергоносій транспортних засобів: клас III охоплює нафтопродукти, пально-мастильні матеріали та паливо. Отже, для парку

електричних транспортних засобів не визначено безпосереднього нормативного аналога запасу пального, що зумовлює необхідність окремого обґрунтування параметрів резервного енергозабезпечення.

Узагальнення розглянутих наукових праць свідчить, що зазначені напрями досліджень розвиваються переважно відокремлено, хоча мають спільні аспекти. Дослідження електрифікації транспорту здебільшого ґрунтуються на припущенні про доступність електропостачання та зосереджуються на економічній ефективності переходу на електричний привід. Праці зі стійкості енергетичних систем детально характеризують порушення електропостачання, проте переважно розглядають стаціонарних споживачів із визначеними графіками навантаження. Дослідження керування заряджанням транспортних парків орієнтовані насамперед на зниження енергетичних витрат і пікових навантажень за умов функціонування електромережі. Нормативні документи з логістичного забезпечення встановлюють вимоги до формування запасів за відповідними класами постачання, проте не визначають окремих нормативів резервування електричної енергії для транспортних засобів з електричним приводом.

Таким чином, задача обґрунтування параметрів резервного енергозабезпечення зарядного вузла підрозділу підвозу потребує комплексного підходу, який поєднує оцінювання доступності електропостачання, енергетичного стану транспортного парку та результативності виконання транспортних завдань. За такого підходу основним критерієм оцінювання доцільно визначити не лише надійність електропостачання чи вартість енергії, а й частку виконання нормативного добового обсягу перевезень.

Методологія дослідження

Об’єктом розрахунку є умовний підрозділ підвозу з парком електричних вантажних автомобілів і власним зарядним вузлом; реальні дані про склад, дислокацію та обсяги підвезення конкретних військових частин не використовуються. Застосовано такі методи: аналіз нормативних документів – для визначення вимог до автономності та класифікації запасів МтЗ; математичне моделювання – для опису добового енергобалансу парку; сценарний аналіз — для оцінювання спроможності за характерних режимів обмеження електропостачання; порівняльний аналіз — для зіставлення двох типів приводу за єдиним показником спроможності; однофакторний аналіз чутливості — для встановлення вхідних параметрів, точність визначення яких є критичною для результату. Розрахунки виконано з кроком 1 годину протягом розрахункового періоду тривалістю 14 діб у середовищі Python; вихідний код моделі наведено в додатку, що дає змогу відтворити всі наведені нижче числові результати.

Понятійне розмежування та вибір показника

Обґрунтування обсягу резерву потребує попереднього розмежування чотирьох понять, які в дотичних дослідженнях і нормативних документах вживаються як близькі, проте описують різні властивості системи.

Надійність електропостачання характеризує зовнішнє джерело і оцінюється за частотою та тривалістю перерв, обсягом недовідпущеної енергії та коефіцієнтом готовності джерела. Це властивість мережі, а не споживача: той самий показник надійності однаково описує живлення пункту базування незалежно від того, який парк на ньому розміщено.

Готовність озброєння та військової техніки характеризує окрему машину й визначається її технічним станом та укомплектованістю. Машина з несправним агрегатом неготова незалежно від стану електропостачання, і навпаки — технічно справна машина з розрядженою батареєю формально готова, проте завдання виконати не може.

Живучість системи логістичного забезпечення, як її визначає бойовий статут [1], є властивістю системи загалом й досягається організаційно-штатною структурою, розміщенням

і своєчасним переміщенням підрозділів, наявністю норм військових запасів та захистом. Це поняття ширше за предмет статті й не зводиться лише до енергозабезпечення.

Транспортна спроможність підрозділу, обрана показником у цьому дослідженні, характеризує результат – обсяг перевезень, який підрозділ фактично здатний виконати за добу. Вона залежить одночасно від технічного стану машин, запасу енергії в них та доступності енергії для його поповнення, тому саме за нею можна зіставити вплив різних чинників за єдиною шкалою.

Вибір транспортної спроможності як показника має два наслідки для постановки задачі. По-перше, резерв обґрунтовується не за критерієм безперервності живлення, а за критерієм збереження результату, тому короткочасне знеструмлення, яке не призводить до невиконання добового завдання, не потребує резервування. По-друге, показник є безрозмірним відношенням фактичного обсягу до нормативного, що дає змогу порівнювати парки з різними типами приводу, для яких натуральні показники запасу енергоносія — кіловат-години та літри – безпосередньо непорівнянні.

Етапи дослідження

Дослідження виконано у 8 етапів, послідовність яких забезпечує відтворюваність результатів.

На першому етапі за нормативними документами з логістичного забезпечення визначено вихідні вимоги до підрозділу: нормативний добовий обсяг підвезення матеріально-технічних засобів, типовий добовий пробіг машини та нормативи автономності за запасами, з якими надалі зіставляється розрахунковий час автономного функціонування парку.

На другому етапі сформовано розрахункову схему добового енергобалансу парку, що пов’язує доступну енергію зарядного вузла із запасом енергії кожної машини та обсягом перевезень, виконаних за добу.

На третьому етапі задано склад і характеристики обладнання: кількість машин, ємність і робочий діапазон заряду тягових батарей, питому витрату енергії з сезонними та режимними поправками, потужність приєднання, кількість і потужність зарядних станцій, установлена потужність фотоелектричної станції, потужність і питому витрату палива резервної дизель-генераторної установки.

На четвертому етапі сформовано набір сценаріїв обмеження електропостачання, кожен із яких задає погодинну доступність зовнішньої мережі протягом розрахункового періоду.

На п’ятому етапі для кожного сценарію та для кожного з трьох рівнів технічного стану батарей виконано покроковий розрахунок: для кожної доби послідовно визначено виконаний обсяг перевезень, залишок енергії в батареях, доступну енергію для заряджання в нічний період, витрату палива резервної установки та стан парку на початок наступної доби. Перенесення залишку енергії між добами є ключовою особливістю розрахунку: воно відтворює накопичення дефіциту, через яке спроможність падає не в момент знеструмлення, а через кілька діб після нього.

На шостому етапі розв’язано обернену задачу: для найважчого сценарію виконано серію розрахунків із послідовно збільшуваним обсягом резерву, і найменше значення, за якого спроможність не опускається нижче нормативного рівня протягом усього періоду, прийнято за необхідний обсяг резерву палива для резервної установки.

На сьомому етапі виконано однофакторний аналіз чутливості отриманого обсягу резерву до вхідних параметрів, значення яких визначаються з найбільшою невизначеністю, що дає змогу встановити, точність вимірювання яких саме величин є критичною для достовірності результату.

На восьмому етапі розрахункову схему поширено на парк із двигунами внутрішнього згоряння — за тією самою логікою, із заміною енергетичного балансу на паливний, що дає

змогу зіставити два типи приводу за єдиним показником спроможності без введення непідтверджених витратних характеристик.

Розрахункова схема

Розглядається підрозділ підвозу, який має парк із N електричних вантажних автомобілів і власний зарядний вузол. Джерелами енергії зарядного вузла є зовнішня електрична мережа, фотоелектрична станція (ФЕС) та резервна дизель-генераторна установка з обмеженим запасом палива (рис. 1).

Зовнішня електрична мережа потужність приєднання $P_{\text{мер}}$ доступність $\chi_{\text{мер}}(t)$	**Фотоелектрична станція** потужність $P_{\text{фес}}(t)$ за профілем інсоляції	**Резервна установка** потужність $P_{\text{дгу}}$ запас палива $V_{\text{рез}}$
↓ Доступна потужність $P_{\text{дост}}(t)$ ↓		
Зарядний вузол $n_{\text{зар}}$ зарядних станцій одиничною потужністю $P_{\text{зар max}}$ фактична зарядна потужність $P_{\text{зар}}(t)$		
↓ Заряджання з ККД $\eta_{\text{зар}}$ ↓		
Тягові батареї парку (N машин) запас енергії $E_i(d)$, технічний стан SoH_i гранична ємність $E_{i\,max}(d)$		
↓ Доступний за запасом енергії пробіг $L_i(d)$ ↓		
Виконання маршрутів підвезення фактичний пробіг $L_i(d) = \min\{L_i(d); L_{\text{пл}}\}$ спроможність $Q_{\text{факт}}(d), K(d) = {Q_{\text{факт}}(d)}/{Q_{\text{потр}}}$		
↑ Зворотний зв'язок: витрата енергії за добу $w_i(d) \cdot L_i(d)$ зменшує запас енергії парку на початок наступної доби ↑		

Рисунок 1. Структурна схема енергозабезпечення парку електричних транспортних засобів підрозділу підвозу

Джерело: розроблено автором.

Зарядний вузол об'єднує три джерела енергії з різними властивостями. Зовнішня електрична мережа є основним джерелом, її доступність задається сценарієм і не залежить від дій підрозділу. Фотоелектрична станція працює як додаткове джерело: вона не потребує підвезення енергоносія й не має теплових та акустичних демаскувальних ознак, проте її потужність визначається профілем інсоляції, тобто максимальна в денні години, коли частина машин перебуває на маршруті, і відсутня вночі, коли відбувається основне заряджання. Резервна дизель-генераторна установка є керованим джерелом: її потужність доступна в будь-який час, але обмежена запасом палива, який і є предметом обґрунтування.

Енергія від цих джерел надходить на зарядні станції, кількість і одинична потужність яких обмежують сумарну зарядну потужність вузла незалежно від доступної потужності джерел. Далі енергія накопичується в тягових батареях машин, які виконують подвійну функцію: є споживачем під час заряджання та внутрішнім резервом під час перерви в живленні. Саме ця подвійність відрізняє розглянуту схему від схеми резервування стаціонарного об'єкта, де відсутність живлення означає негайне припинення роботи споживача.

Замикає схему зворотний зв'язок: виконаний обсяг перевезень визначає витрату енергії за добу, а отже й потребу в її поповненні наступної ночі. Через цей зв'язок дефіцит

енергії переноситься між добами й накопичується, тому оцінювання спроможності лише за окрему добу є некоректним, і розрахунок виконують протягом усього розрахункового періоду.

Показник транспортної спроможності. Спроможність окремої машини за добу *d* визначається як

$$q_i(d) = \gamma \cdot q_{i\,\text{ном}} \cdot \beta \cdot L_i(d) \quad (1)$$

де γ – коефіцієнт використання вантажопідйомності;
$q_{i\,\text{ном}}$ – номінальна вантажопідйомність, т;
β – коефіцієнт використання пробігу;
$L_i(d)$ – доступний за запасом енергії пробіг, км:

$$L_i(d) = \frac{E_i(d) - E_{i\,min}}{w_i(d)} \quad (2)$$

де $E_i(d)$ – запас енергії в тяговій батареї машини на початок доби, кВт·год;
$E_{i\,min}$ – мінімальний допустимий запас, що відповідає нижній межі робочого діапазону заряду, кВт·год;
$w_i(d)$ – питома витрата енергії, кВт·год/км.

Фактичний добовий пробіг обмежений доступним запасом енергії та плановим завданням:

$$\ell_i(d) = min\{L_i(d);\ L_{\text{пл}}\} \quad (3)$$

де $L_{\text{пл}}$ – плановий добовий пробіг машини за маршрутом підвезення, км.

Вираз (3) відображає, що через нестачу енергії машина виконує лише частину планового пробігу, а невиконана частина завдання зумовлює зниження спроможності підрозділу.

Питома витрата енергії враховує сезонні та режимні поправки; істотну залежність питомої витрати електричного транспортного засобу від температури навколишнього середовища та характеру поїздки підтверджено експериментально [14], а значення питомої витрати для електричних вантажних автомобілів за даними реальної експлуатації наведено в [20]:

$$w_i(d) = w_0 \cdot k_{\text{сез}}(d) \cdot k_{\text{нав}}(\gamma) \cdot k_{\text{реж}} \quad (4)$$

де W_0 – базова питома витрата енергії за нормальних умов експлуатації, кВт·год/км;
$k_{\text{сез}}(d)$ – сезонна поправка;
$k_{\text{нав}}(\gamma)$ – поправка на завантаження;
$k_{\text{реж}}$ поправка на режим руху.

Спроможність парку становить $Q_{\text{факт}}(d) = \sum q_i(d)$, а результуючим показником є частка виконання нормативного добового обсягу перевезень:

$$K(d) = \frac{Q_{\text{факт}}(d)}{Q_{\text{потр}}} \quad (5)$$

де $Q_{\text{потр}}$ – нормативний добовий обсяг перевезень, т·км.

Енергобаланс. Погодинна доступна потужність зарядного вузла:

$$P_{\text{дост}}(t) = \chi_{\text{мер}}(t) \cdot P_{\text{мер}} + \chi_{\text{дгу}}(t) \cdot P_{\text{дгу}} + P_{\text{фес}}(t) \quad (6)$$

де $\chi_{\text{мер}}(t) \in \{0,1\}$ – ознака доступності зовнішньої мережі в годину t, що задається сценарієм обмеження електропостачання;
$P_{\text{мер}}$ – потужність приєднання зарядного вузла, кВт;
$\chi_{\text{ДГУ}}(t) \in \{0,1\}$ – ознака роботи резервної дизель-генераторної установки;
$P_{\text{дгу}}$ – її номінальна потужність, кВт;
$P_{\text{фес}}(t)$ – потужність фотоелектричної станції за профілем інсоляції, кВт.

Фактична зарядна потужність обмежена джерелом, обладнанням та приймальною здатністю батарей:

$$P_{\text{зар}}(t) = min\{P_{\text{дост}}(t);\ n_{\text{зар}} \cdot P_{\text{зар}\,max};\ \Sigma_i P_{\text{прийм}\,i}\} \quad (7)$$

де $n_{\text{зар}}$ – кількість зарядних станцій вузла;
$P_{\text{зар max}}$ – номінальна потужність однієї станції, кВт;
$P_{\text{прийм}\,i}$ – ознака роботи резервної дизель-генераторної установки;

Сумарна зарядна потужність розподіляється між машинами, які перебувають у пункті базування і не досягли граничної ємності. Позначивши цю множину через $A(t)$, потужність, виділену машині і в годину t, визначаємо як

$$p_i(t) = min\{\frac{P_{\text{зар}}(t)}{n(t)};\ P_{\text{прийм}\,i}(t);\ \frac{E_{i\,max}(d) - E_i(t)}{\eta_{\text{зар}}\,\Delta t}\} \quad (8)$$

де $n(t)$ – кількість машин у множині $A(t)$.

Потужність, не спожита машинами, для яких обмежувальним виявився другий або третій аргумент, протягом тієї самої години перерозподіляється між рештою машин множини $A(t)$ повторним застосуванням виразу (8) до залишку сумарної потужності; ітерації припиняються, коли залишок вичерпано або жодна машина не здатна прийняти додаткову потужність. Машина, що перебуває на маршруті, до множини $A(t)$ не входить.

Запас енергії машини оновлюється за виразом

$$E_i(d+1) = min\{E_i(d) - w_i(d) \cdot \ell_i(d) + \eta_{\text{зар}}\,\Sigma_t\, p_i(t);\ E_{i\,max}(d)\} \quad (9)$$

де $\ell_i(d)$ – фактичний пробіг за добу, км;
$p_i(t)$ – зарядна потужність, виділена машині і в годину t, кВт;
$\eta_{\text{зар}}$ – коефіцієнт корисної дії (ККД) заряджання.

Гранична ємність з урахуванням технічного стану батареї:

$$E_{i\,max}(d) = E_{\text{ном}} \cdot SoH_i \cdot (SoC_{max} - SoC_{min}) \quad (10)$$

де $E_{\text{ном}}$ – номінальна ємність тягової батареї, кВт·год;
SoH_i – технічний стан батареї машини і, в. о. (state of health);
SoC_{min} – верхня та нижня межі робочого діапазону заряду, в. о. (state of charge).

Зниження ємності тягової акумуляторної батареї з напрацюванням є усталеним результатом досліджень деградації [22, 33], тому SoH прийнято змінним параметром розрахунку, а не сталою величиною.

Витрата палива резервної установки:

$$V_{\text{пал}}(d+1) = V_{\text{пал}}(d) - g_{\text{пит}} \cdot \Sigma_t\, \chi_{\text{дгу}}(t) \cdot P_{\text{дгу}} \cdot \Delta t \quad (11)$$

де $V_{\text{пал}}(d)$ – запас палива резервної установки на початок доби, л;
$g_{\text{пит}}$ – питома витрата палива, л/(кВт·год);
Δt – крок розрахунку, год.

Прийняті допущення. Заряджання парку здійснюється в нічному часовому вікні, а вдень машини перебувають на маршрутах підвезення; підзаряджання машин, які через нестачу енергії залишилися в пункті базування, не передбачено. Це допущення робить сценарії з нічними обмеженнями свідомо консервативними: воно відповідає порядку, за якого зарядний вузол працює за встановленим добовим графіком, а потужність приєднання вдень зарезервована для інших споживачів пункту базування. Зарядна потужність розподіляється між машинами порівну до досягнення граничної ємності; планові маршрути та добовий обсяг перевезень незмінні протягом розрахункового періоду; резервна установка вважається технічно справною протягом усього періоду; її робота обмежена лише запасом палива; технічний стан батарей протягом одного розрахункового періоду не змінюється.

У програмній реалізації розрахункової схеми застосовано агрегований підхід до оцінювання енергетичного запасу парку електричних транспортних засобів. Прийнято, що всі автомобілі мають однакові технічні характеристики, рівень технічного стану тягових акумуляторних батарей, початковий рівень заряду та плановий добовий пробіг. За таких умов сумарний запас енергії парку використовується для визначення частки виконання нормативного добового обсягу перевезень. Застосування запропонованої моделі до неоднорідного парку потребує індивідуального обліку енергетичного стану кожного транспортного засобу та розподілу зарядної потужності між автомобілями.

Алгоритм погодинного розрахунку. Розрахунок реалізовано як подвійний цикл – за добами розрахункового періоду і за годинами доби – у такій послідовності.

Крок 1: ініціалізація – початковий рівень заряду всіх машин відповідає верхній межі робочого діапазону, запас палива резервної установки дорівнює $V_{\text{рез}}$, доба $d = 1$. Заряджання виконується у вікні 00:00–08:00, рух — у проміжку 08:00–20:00, генерація фотоелектричної станції припадає на світлові години.

Крок 2: для кожної години t = 1…24 за сценарієм визначається ознака $\chi_{\text{мер}}(t)$, за профілем інсоляції – $P_{\text{фес}}(t)$, і обчислюється доступна потужність за виразом (6).

Крок 3: резервна установка вмикається $\chi_{\text{ДГУ}}(t)$= 1 лише тоді, коли потужності мережі та фотоелектричної станції недостатньо для заряджання наявних у пункті базування машин і в баку є паливо; вона працює на номінальній потужності й лише в обсязі, потрібному для поповнення запасу енергії парку, а витрата палива нараховується пропорційно фактично відданій потужності.

Крок 4: обчислюється сумарна зарядна потужність за виразом (7) і виконується її розподіл між машинами за виразом (8) з перерозподілом залишку.

Крок 5: витрата палива резервної установки за годину віднімається від наявного запасу за виразом (11); за вичерпання запасу установка більше не вмикається.

Крок 6: після завершення доби обчислюються фактичний пробіг кожної машини за виразом (3), запас енергії на початок наступної доби за виразом (9) і показник спроможності за виразом (5).

Крок 7: перехід до доби d + 1 до завершення розрахункового періоду.

Модель паливоспоживання установки. Паспорт Cat XQP100 (EU Stage IIIA) задає витрату в трьох точках: 14,6 л/год за 50 % навантаження, 20,3 л/год за 75 % і 23,5 л/год за 100 %. Залежність не є лінійною: питома витрата становить відповідно 0,365; 0,338 і 0,294 л/(кВт·год), тобто зменшується зі зниженням навантаження. У моделі прийнято режим вмикання на номінальній потужності на потрібну частку години, а не роботу на частковому навантаженні протягом усієї години; витрата нараховується пропорційно часу роботи за паспортним значенням для 100 %. Такий режим є найекономнішим із можливих і відповідає практиці керування резервним агрегатом відповідно до фактичних потреб.

Щоб оцінити вплив цього припущення, розрахунок повторено за консервативною альтернативою — з питомою витратою, що відповідає роботі на 50 % навантаження протягом усього часу (0,365 л/(кВт·год)). Потрібний обсяг резерву зростає з 387, 405 і 422 л до 481, 503 і 525 л відповідно, тобто на 24 % для всіх трьох рівнів технічного стану батарей. Різниця між двома режимами є систематичною і не змінює жодного якісного висновку, проте показує, що вибір режиму роботи установки є таким самим предметом обґрунтування, як і обсяг палива.

Обернену задачу розв’язують за допомогою зовнішнього циклу цього алгоритму: значення $V_{\text{рез}}$ збільшується з кроком 1 л починаючи з нуля, для кожного значення виконується повний розрахунок на всьому періоді, і перше значення, за якого $K_{(d)} \geq 1$ для всіх діб, приймається за $V_{\text{рез}}$ *.

Контроль коректності розрахунку. Коректність розрахунку контролюють за допомогою чотирьох перевірок. Перша — баланс енергії: для кожної доби сума енергії, спожитої на рух, запасеної в батареях та втраченої під час заряджання, звіряється з енергією, відданою зарядним вузлом. Друга — виродження задачі: за сценарію без обмежень електропостачання і за відсутності деградації батарей розрахунок має давати повне виконання нормативного обсягу перевезень, інакше вхідні дані або склад парку задано суперечливо. Третя – контроль граничних умов: запас енергії жодної машини не виходить за межі робочого діапазону заряду, а зарядна потужність не перевищує жодного з трьох обмежень. Четверта – перевірка чутливості до тривалості перехідного періоду: перші доби розрахунку, коли парк починає роботу з повністю зарядженими батареями, відкидаються, і встановлюється, з якої доби результат перестає залежати від початкового стану.

Окремої уваги потребує прийняте значення базової питомої витрати енергії. Заявлений запас ходу 330 км за циклом CLTC за номінальної ємності 132 кВт·год відповідає 0,40 кВт·год/км, тоді як у розрахунку прийнято 0,32 кВт·год/км із сезонною поправкою — 0,368 кВт·год/км. Оскільки заявлений запас ходу визначено за випробувальним циклом, а не за фактичними умовами підвезення – з повним завантаженням, у зимовий період і на дорогах з обмеженою прохідністю, – співвідношення 0,40 кВт·год/км слід розглядати як нижню оцінку питомої витрати в експлуатації, а розрив із прийнятим у розрахунку значенням – як не менший за наведений. Обидва значення сумісні з добовим завданням 200 км: за прийнятого значення корисний запас 92,4 кВт·год забезпечує 251 км, за заявленого за циклом CLTC – 201 км, тобто практично без запасу. Оскільки еластичність потрібного обсягу резерву за цим параметром дорівнює одиниці (табл. 6), перехід до заявленого значення збільшив би потрібний обсяг резерву приблизно в тій самій пропорції – щонайменше на чверть. Тому наведені значення $V_{\text{рез}}$ * відповідають сприятливій оцінці питомої витрати, і під час подання результатів це слід зазначати разом із самими числами. Уточнення цього параметра за даними фактичної експлуатації парку є першочерговим напрямом підвищення достовірності розрахунку.

Обмеження вхідних даних. У розрахунку використано усереднені характеристики: питома витрата енергії задається сезонною поправкою, а не погодинним температурним профілем; технічний стан усіх батарей парку приймається однаковим, хоча в експлуатації машини мають різне напрацювання; технічний стан резервної установки вважається незмінним. Частина цих спрощень спричиняє завищення оцінки спроможності — зокрема, припущення про незмінну справність резервної установки та обладнання зарядного вузла; інші (усереднена питома витрата, прийнятий профіль інсоляції конкретного року) можуть як підвищувати, так і знижувати оцінку спроможності. Оскільки прийняті припущення діють у різних напрямах — допущення про нічне вікно заряджання підвищує розрахункову потребу в резерві, а допущення про незмінну справність обладнання її знижує, — отримані значення слід розглядати як розрахункову оцінку потреби в резерві за прийнятих умов; вони не є гарантованою верхньою або нижньою межею для всіх можливих умов експлуатації.

Сценарії та вхідні дані

Сценарії обмеження електропостачання прийнято як характерні розрахункові умови і не розглядаються як прогноз. Розрахунковий період — 14 діб (табл. 1).

Набір сценаріїв сформовано за трьома ознаками: тривалістю відсутності живлення протягом доби, збігом цієї відсутності з періодом заряджання та тривалістю безперервного знеструмлення.

Сценарії С1 і С2 відтворюють режим погодинних обмежень електропостачання, за якого живлення переривається за встановленим графіком і відновлюється протягом тієї ж доби. Добову тривалість обмежень 8 год та 12–16 год прийнято як таку, що відповідає характерним режимам обмежень у період сезонного дефіциту потужності. Ключовим для

парку є не сама тривалість, а її збіг із періодом заряджання, тому сценарій помірних обмежень розділено на два підваріанти – нічний і денний – з однаковою добовою тривалістю.

Сценарій С3 відтворює наслідок ураження об’єкта електромережі: безперервну відсутність живлення протягом 72 годин із подальшим переходом до режиму обмежень, що відповідає частковому відновленню постачання. Цей сценарій прийнято за розрахунковий для обґрунтування обсягу резерву як найважчий із тих, що передбачають відновлення спроможності в межах розрахункового періоду.

Сценарій С4 є граничним і призначений не для обґрунтування резерву, а для перевірки відповідності нормативу автономності, тому його тривалість визначена не розрахунково, а нормативно.

Сценарії задають лише погодинну доступність зовнішньої мережі. Імовірність настання кожного з них не оцінювалася, тому набір слід розглядати як перелік розрахункових умов, за яких перевіряється спроможність парку, а не як прогноз режиму електропостачання.

Таблиця 1. Сценарії обмеження електропостачання

Позначення	Назва	Режим зовнішньої мережі	Призначення
С0	Базовий	без обмежень	точка відліку
С1н	Помірні обмеження, нічні	відсутність живлення 8 год на добу в години заряджання	типовий зимовий режим
С1д	Помірні обмеження, денні	відсутність живлення 8 год на добу поза годинами заряджання	оцінка впливу часу відключень
С2	Жорсткі обмеження	відсутність живлення 12–16 год на добу	піковий режим обмежень
С3	Локальне знеструмлення	відсутність живлення 72 год, далі режим С2	ураження об’єкта електромережі
С4	Тривала ізоляція	відсутність живлення 9 діб	перевірка нормативу автономності

Джерело: розроблено автором.

Порівняння С1н і С1д дає оцінку впливу збігу часу відключень із періодом заряджання за незмінної добової тривалості обмежень.

Тривалість сценарію С4 прийнято такою, що дорівнює нормативу автономності військової частини за запасами МтЗ, установленому бойовим статутом [1]: у підрозділах — до 4 діб, у військовій частині — до 9 діб. Норматив автономності за запасами МтЗ використано як зовнішній орієнтир для оцінювання транспортної складової автономності, а не як норматив, що прямо встановлює вимогу до запасу електричної енергії: час автономного функціонування парку зіставляється з ним, але з нього не виводиться. Парк, час автономного функціонування якого менший за 4 доби, не забезпечує нормативної автономності підрозділу за транспортною складовою, навіть якщо запаси інших МтЗ відповідають установленим нормам.

Вихідні дані для розрахунку наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Походження
Кількість машин у парку	N	6	розрахункове припущення
Номінальна ємність батареї	$E_{\text{ном}}$	132 кВт·год	ТТХ BYD T5 EV, версія 132 кВт·год
Заявлений запас ходу	–	330 км (CLTC)	ТТХ BYD T5 EV, версія 132 кВт·год
Робочий діапазон заряду	$SoC_{\max} - SoC_{\min}$	0,90 – 0,20	розрахункове припущення
Рівні технічного стану батареї	SoH	1,0 / 0,9 / 0,8	розрахункові варіанти
Базова питома витрата енергії	w_0	0,32 кВт·год/км	розрахункове припущення, див. примітку
Сезонна поправка	$k_{\text{сез}}$	1,15	розрахункове припущення
Коефіцієнт використання вантажопідйомності	γ	0,80	розрахункове припущення
Номінальна вантажопідйомність	$q_{\text{ном}}$	0,99 т	ТТХ BYD T5 EV, версія 132 кВт·год
Коефіцієнт використання пробігу	β	0,50	розрахункове припущення
Плановий добовий пробіг машини	$L_{\text{пл}}$	200 км/добу	розрахункове припущення
Нормативний добовий обсяг перевезень	$Q_{\text{потр}}$	475,2 т·км	$N \cdot \gamma \cdot q_{\text{ном}} \cdot \beta \cdot L_{\text{пл}}$
Потужність приєднання зарядного вузла	$P_{\text{мер}}$	100 кВт	розрахункове припущення
Кількість і потужність зарядних станцій	$n_{\text{зар}}$, $P_{\text{зар}\,max}$	6 × 22 кВт	розрахункове припущення
Установлена потужність ФЕС	$P_{\text{фес}}$	29,25 кВт	власні результати [6]
Профіль інсоляції, м. Одеса	$P_{\text{фес}}\,(t)$	за базою PVGIS	[9]
Добовий виробіток ФЕС за профілем	–	92,1 кВт·год	розрахунок за профілем
Потужність резервної установки	$P_{\text{дгу}}$	80 кВт (100 кВ·А)	ТТХ Cat XQP100, EU Stage IIIA
Витрата палива установки	$q_{\text{дгу}}$	23,5 л/год	ТТХ Cat XQP100 за 100 % навантаження
Питома витрата палива установки	$g_{\text{пит}}$	0,294 л/(кВт·год)	23,5 / 80
Вікно заряджання парку	–	8 год (00:00–08:00)	розрахункове припущення
ККД заряджання	$\eta_{\text{зар}}$	0,92	розрахункове припущення

Джерело: складено автором за даними [6, 9, 17, 19, 21].

Примітка. Профіль інсоляції отримано з бази даних Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) [9]. Технічні характеристики електричного вантажного автомобіля наведено для модифікації BYD T5 EV з тяговою акумуляторною батареєю номінальною ємністю 132 кВт·год [19]. Параметри резервної дизель-генераторної установки відповідають модифікації Cat XQP100 (EU Stage IIIA) [17]. Склад транспортного парку, графік руху та параметри зарядної інфраструктури прийнято як розрахункові припущення для умовного підрозділу підвозу.

Для моделювання роботи резервної дизель-генераторної установки використано паспортні характеристики Cat XQP100 у модифікації EU Stage IIIA, для якої витрата палива за номінального навантаження становить 23,5 л/год [17]. Для модифікації Best Specific Fuel Consumption відповідний показник становить 22,6 л/год. У розрахунковій моделі прийнято режим роботи установки на номінальній потужності. Вплив цього припущення на необхідний обсяг резерву палива оцінено шляхом порівняння альтернативних режимів споживання палива.

Ємність тягової акумуляторної батареї, паспортний запас ходу та вантажопідйомність визначено за технічними характеристиками BYD T5 EV у модифікації з батареєю номінальною ємністю 132 кВт·год [19]. Водночас виробник пропонує модифікації з ємністю батарей у діапазоні 82–132 кВт·год [21]. Співвідношення номінальної ємності батареї та заявленого запасу ходу 330 км за випробувальним циклом China Light-Duty Vehicle Test Cycle (CLTC) становить 0,40 кВт·год/км. Однак зазначене співвідношення не можна безпосередньо ототожнювати з фактичною питомою витратою енергії в умовах військового підвезення або порівнювати без відповідних застережень із результатами інших випробувальних процедур, зокрема Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure (WLTP). У моделі прийнято базову питому витрату енергії $w_0 = 0{,}32\ \text{кВт} \cdot \text{год/км}$, що з урахуванням сезонного коефіцієнта 1,15 становить 0,368 кВт·год/км. Це значення є розрахунковим припущенням для сприятливих умов експлуатації, сформованим з урахуванням попередніх результатів автора [6]. Вплив невизначеності питомої витрати енергії на результати моделювання розглянуто під час аналізу чутливості та визначення меж дослідження.

За умови однорідності транспортного парку та однакових значень коефіцієнтів використання вантажопідйомності й пробігу для всіх автомобілів коефіцієнти γ, $q_{\text{ном}}$ і β однаково входять до чисельника та знаменника показника (5) і скорочуються. Унаслідок цього показник транспортної спроможності набуває вигляду:

$$K(d) = \Sigma_{\text{i}}\, \ell_{\text{i}}(d) \,/\, (N \cdot L\text{пл}).$$

Отже, за прийнятих припущень результати оцінювання транспортної спроможності не залежать від значень зазначених коефіцієнтів, зокрема від номінальної вантажопідйомності автомобілів. Показник характеризує частку виконаного планового пробігу, забезпеченого наявним запасом енергії, проте не відображає повної оперативної спроможності підрозділу. Зокрема, він не враховує пріоритетності вантажів, своєчасності доставки, вибору та прохідності маршрутів, а також можливих змін у транспортному завданні під час його виконання. Зазначені чинники потребують окремого оцінювання. Нормативний добовий обсяг транспортної роботи $Q_{\text{потр}} = 475{,}2\ \text{т} \cdot \text{км}$ розраховано за паспортною вантажопідйомністю прийнятого зразка транспортного засобу та використано для вираження транспортної спроможності в натуральних одиницях.

Результати

Результати подано в трьох підрозділах. Спершу наведено спроможність парку за кожним сценарієм обмеження електропостачання за повного технічного стану батарей, що дає змогу визначити, які режими обмежень підрозділ витримує без резервного джерела живлення. Далі розв'язано обернену задачу — визначено необхідний обсяг резерву за трьома рівнями

технічного стану батарей. Насамкінець, наведено розрахункову схему для парку на дизельному паливі, яка дає змогу зіставити два типи приводу за єдиним показником спроможності.

Спроможність парку за сценаріями

Динаміку частки виконання нормативного добового обсягу перевезень за всіма сценаріями наведено на рис. 2, а зведені показники спроможності — у табл. 3.

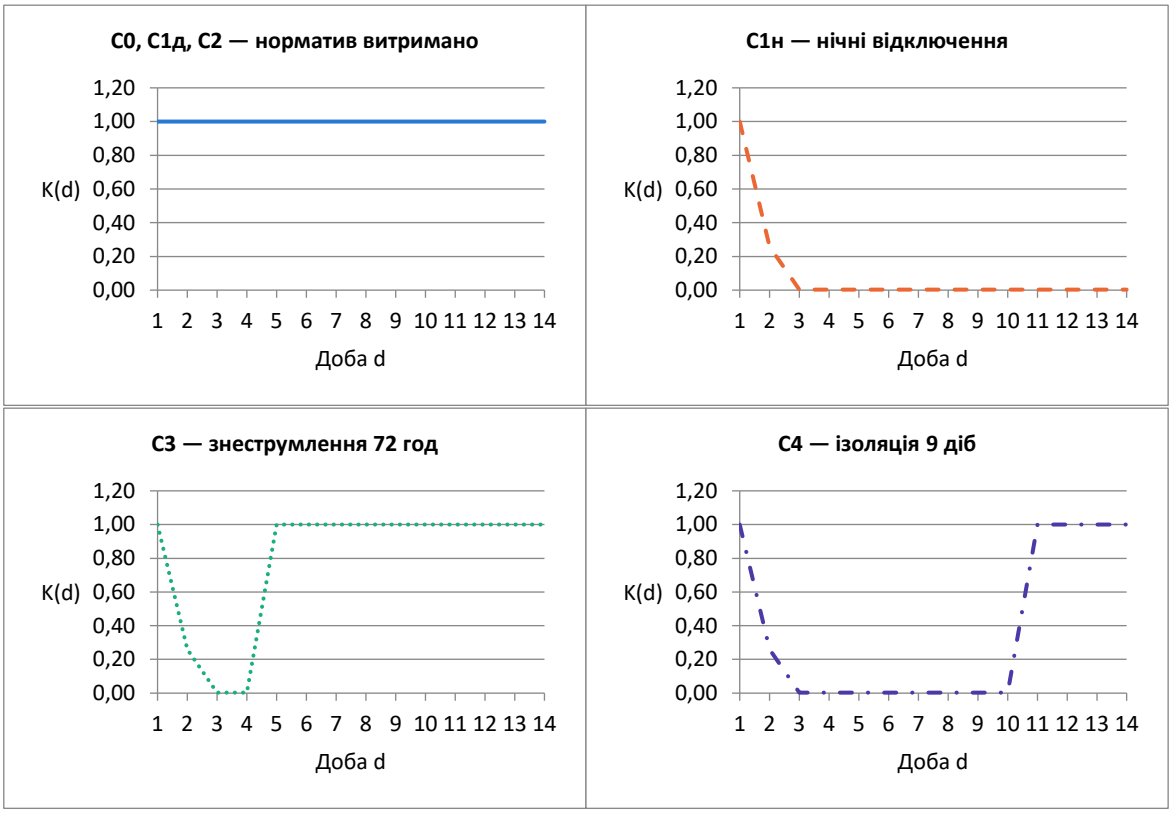


Рисунок 2. Динаміка частки виконання нормативного добового обсягу перевезень K(d) за сценаріями C0–C4

Джерело: розрахунки автора.

Добова потреба парку в тяговій енергії становить 441,6 кВт·год, а з урахуванням ККД заряджання зарядний вузол має віддати 480,0 кВт·год. За потужності приєднання 100 кВт для відновлення цього обсягу потрібно близько 4,8 год ефективної роботи вузла, тобто значно менше, ніж тривалість нічного періоду. Саме тому визначальним є не сумарна тривалість обмеження протягом доби, а його збіг із періодом заряджання.

За базових параметрів і прийнятого графіка заряджання сценарії C0, C1д і C2 не знижують добову спроможність нижче нормативного рівня: наявне вікно живлення збігається з періодом заряджання, і його достатньо для повного відновлення запасу енергії парку. За сценарієм C1н втрата нічного заряджання змушує парк працювати за рахунок початкового енергетичного буфера: на другу добу виконується 25,5 % нормативу, а з третьої доби спроможність падає до нуля й надалі не відновлюється, оскільки обмеження повторюється щодоби. За сценарієм C3 той самий механізм діє протягом 72 год знеструмлення: спроможність дорівнює нулю на третю та четверту доби й повністю відновлюється на п'яту добу після повернення живлення; середня спроможність за 14 діб становить 80,4 %. За сценарієм C4 дев'ятидобова ізоляція подовжує період нульової спроможності до восьми діб, що знижує середню спроможність до 37,5 %.

Таблиця 3. Показники спроможності парку за сценаріями

Сценарій	Мінімальне $K(d)$	Доба мінімуму	Середнє K	Час автономності, діб
С0	1,00	—	1,00	—
С1н	0,00	3	0,09	1,26
С1д	1,00	—	1,00	—
С2	1,00	—	1,00	—
С3	0,00	3	0,80	1,26
С4	0,00	3	0,38	1,26

Джерело: розрахунки автора. Час автономності визначено як відношення корисного запасу енергії парку до добової потреби в тяговій енергії: 554,4 / 441,6 = 1,26 доби. Ця величина характеризує сам парк, а не сценарій, тому вона однакова для всіх режимів, за яких заряджання припиняється. Сценарій С2 передбачає, що наявні 8 год живлення на добу збігаються з періодом заряджання.

Зіставлення сценаріїв $\mathrm{С1н}$ і $\mathrm{С1д}$ дозволяє оцінити ефект від узгодження часу заряджання з графіком обмежень електропостачання за незмінної добової тривалості цих обмежень: за однакових 8 год відсутності живлення перенесення заряджання на доступні години забезпечує виконання 100 % нормативного добового обсягу перевезень протягом усього періоду ($K(d) = 1$), тоді як збіг відключення з нічним заряджанням знижує середнє значення показника до 0,09.

Обґрунтування обсягу резервного джерела живлення

Потрібний обсяг резерву визначається як найменше значення, за якого спроможність парку не опускається нижче нормативного рівня протягом усього розрахункового періоду за сценарієм С3:

$$V_{\text{рез}}{}^{*} = min\{V_{\text{рез}} : K(d) \geq 1 \; \forall d = 1 \dots D\} \qquad (12)$$

де $V_{\text{рез}}$ — обсяг резерву палива, л;

D — тривалість розрахункового періоду, діб.

Сценарій С3 прийнято як розрахунковий для обґрунтування резерву не тому, що він формує найбільшу потребу серед усіх розглянутих режимів, а тому, що він є найважчим із тих, за яких парк має відновити спроможність у межах розрахункового періоду за рахунок власного резерву. Сценарій С4 має іншу функцію — перевірку відповідності нормативному орієнтиру автономності — і за своєю тривалістю потребує істотно більшого обсягу палива, визначення якого виконується за тією самою процедурою (11) із заміною тривалості знеструмлення. Отже, отримані нижче значення $V_{\text{рез}}*$ належить читати як обґрунтовані для режиму С3, а не як універсальні для будь-якої тривалості порушення електропостачання.

Задача розв'язується скануванням за сіткою значень *V* рез з кроком 1 л для трьох рівнів технічного стану батарей: для кожного значення виконується повний погодинний розрахунок на всьому періоді, і перше значення, за якого умова $K(d) \geq 1$ виконується для всіх діб, приймається за *V* рез*.

Для узгодження з чинною системою визначення потреби в пальному отриманий обсяг доцільно виражати також у розрахунково-постачальних одиницях — заправках агрегату електроживлення, які згідно з бойовим статутом [1] визначається кількістю пального, що забезпечує роботу агрегату протягом установленого часу. Це дозволяє безпосередньо включити резерв зарядного вузла до планування забезпечення військової частини паливом.

Потужність резерву – перша умова. Розрахунок показав, що обсяг палива є другою за черговістю умовою: перед ним діє обмеження за потужністю. За вікна заряджання тривалістю 8 год резервна установка, працюючи на половині номінальної потужності (40 кВт), віддає за

ніч 320 кВт·год, або 294,4 кВт·год тягової енергії з урахуванням ККД заряджання, тоді як добова потреба парку становить 441,6 кВт·год. Дефіцит 147,2 кВт·год за добу не може бути компенсований жодним обсягом палива, тому за цієї робочої точки задача (12) розв'язку не має: сканування за сіткою значень V рез до 6000 л не дає жодного значення, за якого $K(d) \geq 1$ для всіх діб. На номінальній потужності 80 кВт установка віддає за те саме вікно 640 кВт·год, або 588,8 кВт·год тягової енергії, що перевищує добову потребу, і задача стає розв'язною. Тому в подальших розрахунках резервна установка працює на номінальній потужності, а питома витрата палива взята для відповідного режиму.

Цей результат має самостійне практичне значення: вимога до резервного джерела живлення зарядного вузла є двоскладовою, і потужність у ній є первинною. Резерв, визначений лише за обсягом палива, не забезпечує спроможності підрозділу, якщо потужність установки не покриває добової потреби парку в межах доступного вікна заряджання.

Залежність мінімального за розрахунковий період значення показника спроможності від обсягу резерву за трьох рівнів технічного стану батарей показано на рис. 3, а знайдені за критерієм (12) значення потрібного обсягу — у табл. 4.

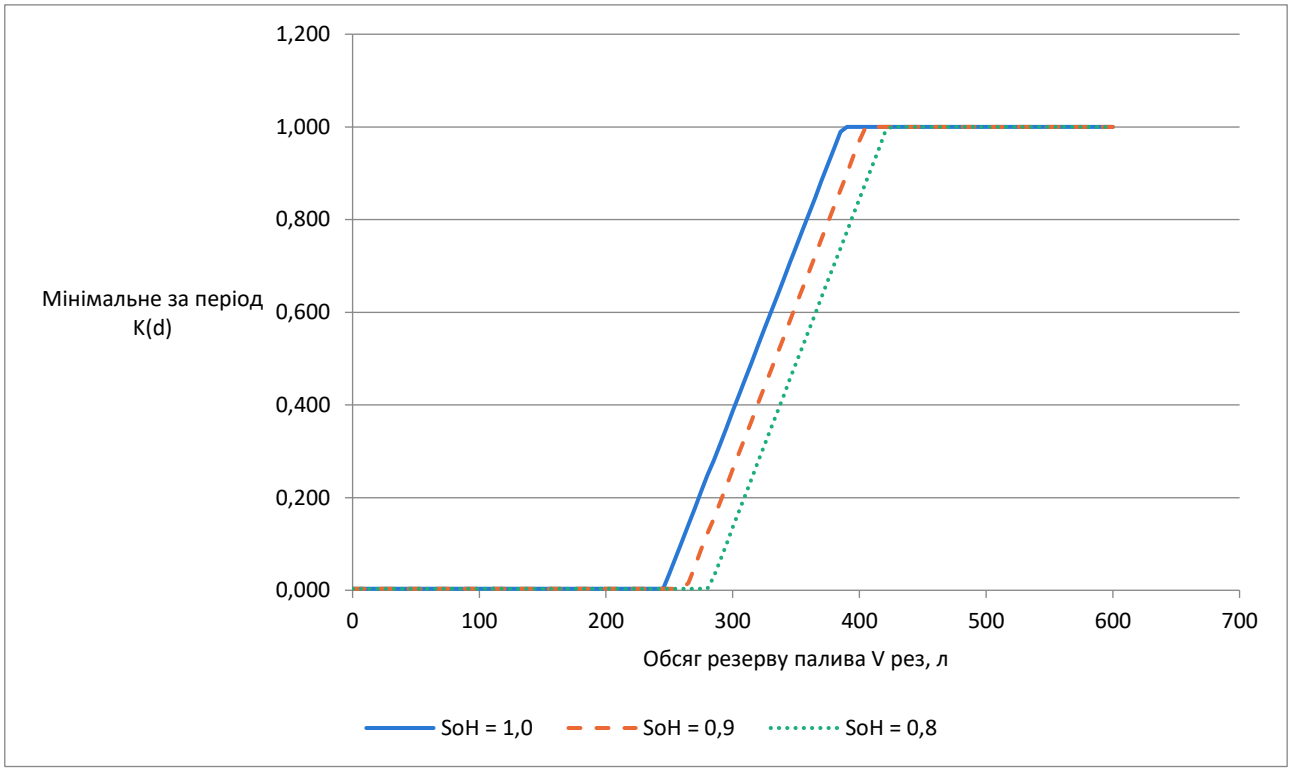


Рисунок 3. Залежність мінімального за розрахунковий період значення K(d) від обсягу резерву палива за рівнів технічного стану батарей SoH = 1,0; 0,9; 0,8 (сценарій С3)

Джерело: розрахунки автора за моделлю, наведеною в додатку. Найменші обсяги, за яких показник досягає нормативного рівня, наведено в табл. 4.

Криві мають характерну форму з трьох ділянок. До 240–280 л резерв не змінює результату: палива не вистачає навіть на одну повну ніч заряджання, і показник залишається нульовим. Далі йде ділянка швидкого зростання, на якій кожен додатковий літр безпосередньо збільшує пробіг, доступний парку в найгіршу добу. Після досягнення нормативного рівня крива виходить на плато: подальше збільшення резерву спроможності вже не підвищує, оскільки його обмежує не енергія, а планове завдання.

Таблиця 4. Потрібний обсяг резерву за рівнями технічного стану батарей

Рівень SoH	Потрібний обсяг $V_{\text{рез}}$ *, л	Тривалість роботи установки, год	Приріст відносно $SoH = 1,0$, %
1,0	387	16,5	—
0,9	405	17,2	4,7
0,8	422	18,0	9,0

Джерело: розрахунки автора для сценарію С3 (знеструмлення 72 год), крок сканування 1 л. Резервна установка працює на номінальній потужності 80 кВт із витратою 23,5 л/год.

Зниження ємності тягових батарей зменшує енергетичний буфер парку, внаслідок чого той самий сценарій знеструмлення вимагає більшого обсягу резервного палива: 387 л за SoH = 1,0 і 422 л за SoH = 0,8, тобто на 9,0 % більше. Рівень SoH = 0,8 прийнято в цьому дослідженні як граничну розрахункову умову експлуатації, а не як установлена межа ресурсу батареї. Звідси випливає практична вимога: у межах дослідженого діапазону SoH = 1,0–0,8 обсяг резервного джерела живлення слід обґрунтовувати за граничним прийнятим рівнем технічного стану батарей, а не за їх початковим станом.

Межа придатності конфігурації за технічним станом батарей. Розрахунок виявив обставину, істотнішу за сам приріст потреби в резерві. Корисний запас енергії парку за SoH = 0,8 становить 443,5 кВт·год проти добової потреби 441,6 кВт·год, тобто перевищує її лише на 0,43 %. Критичне значення технічного стану, за якого корисний запас дорівнює добовій потребі, становить $SoH = 0{,}797$. Нижче цього рівня парк не виконує нормативного добового обсягу перевезень навіть за повністю справного зовнішнього електропостачання, і жодний обсяг резерву цього не змінює, оскільки обмеження переходить від енергозабезпечення до ємності накопичувача.

Для прийнятої конфігурації це означає, що діапазон $SoH = 1{,}0 - 0{,}8$ є не довільно обраним, а практично збігається з межею придатності парку до виконання заданого обсягу перевезень. Відповідно, вимога до технічного стану тягових батарей у цій конфігурації є не менш жорсткою, ніж вимога до резервного джерела живлення, і підлягає контролю нарівні з нею.

У перерахунку на розрахунково-постачальні одиниці 422 л відповідають 18,0 год роботи агрегату електроживлення на номінальній потужності, що й доцільно закладати у вимогу до запасу пального зарядного вузла.

Отримані значення слід читати саме як запас палива за критерієм збереження спроможності, а не як паливо для безперервної роботи установки протягом усього знеструмлення. Робота установки протягом 72 год на номінальній потужності потребувала б 1692 л — вчетверо більше. Різниця виникає тому, що установка працює лише у вікні заряджання й лише в обсязі, потрібному для поповнення запасу енергії парку до рівня наступної доби, а частина потреби покривається енергією, накопиченою в батареях до початку знеструмлення.

Слід також розрізняти обсяг і потужність резерву. Потужність резерву становить 80 кВт, обсяг — 387–422 л; як показано вище, обидві величини обмежують результат незалежно одна від одної, причому потужність є первинною. Водночас установлена потужність зарядних станцій 6 × 22 = 132 кВт перевищує потужність установки, тому в режимі роботи на резерві обмежувальним чинником є саме установка, і нарощування кількості зарядних станцій не підвищує спроможності.

Область розв'язності задачі

Обмеження за потужністю, розглянуте вище, не є єдиним. Перед ним діє ще жорсткіша

умова, що не залежить ні від потужності резервної установки, ні від обсягу палива: корисний запас енергії парку має бути не меншим за добову потребу в тяговій енергії. Інакше машина фізично не може подолати плановий добовий пробіг навіть за повністю зарядженої батареї, і жодне джерело живлення цього не змінює, оскільки заряджання в русі схемою не передбачене. Умова має замкнений вигляд

$$L_{\text{пл}} \leq \frac{E_{\text{ном}}(SoC_{max} - SoC_{min}) \cdot SoH}{w_0 \cdot k_{\text{сез}}} \qquad (13)$$

і визначає область значень вхідних параметрів, у якій задача (12) взагалі має розв'язок. За межами цієї області показник $K(d)$ не досягає нормативного рівня за жодного обсягу резерву, тому пошук $V_{\text{рез}}$* позбавлений змісту.

Ця обставина має безпосереднє значення для достовірності наведених результатів. Прийняте базове значення питомої витрати енергії $w_0 = 0{,}32$ кВт · год/км є оцінкою для сприятливих умов, тоді як заявлений виробником запас ходу становить 0,40 кВт·год/км. Різниця між цими двома значеннями не зводиться до похибки результату: вона переносить задачу з однієї області в іншу. Розрахунок за трьома значеннями питомої витрати наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Потрібний обсяг резерву за різних значень питомої витрати енергії

w_0, кВт·год/км	Добова потреба парку, кВт·год	$V_{\text{рез}}$ * за SoH = 1,0, л	$V_{\text{рез}}$ * за SoH = 0,9, л	$V_{\text{рез}}$ * за SoH = 0,8, л	SoH кр
0,32 (базове)	441,6	387	405	422	0,797
0,368	507,8	472	не існує	не існує	0,916
0,40 (заявлене)	552,0	527	не існує	не існує	0,996

Джерело: розрахунки автора за сценарієм С3 і плановим добовим пробігом 200 км. Усі значення *w* 0 наведено до застосування сезонної поправки $k_{\text{сез}} = 1{,}15$; добову потребу обчислено з її урахуванням. SoH кр — критичне значення технічного стану, нижче якого задача розв'язку не має. "Не існує" означає, що умова $K(d) \geq 1$ не виконується для жодного обсягу резерву.

Результат однозначний: за заявленої виробником питомої витрати прийнята конфігурація виконує нормативний добовий обсяг перевезень лише з новими батареями, причому з запасом ємності 0,4 %. Уже за $SoH = 0{,}9$ задача стає нерозв'язною. Отже, значення 387–422 л не є стійкими до зміни цього параметра, і подавати їх як норму забезпечення без зазначення умов, за яких вони отримані, неприпустимо.

Область розв'язності в координатах "питома витрата енергії — технічний стан батарей" для планового добового пробігу 200 км показано на рис. 4. Межа, задана виразом (13), розділяє площину на дві частини: вище неї задача має розв'язок, а колірна шкала показує потрібний обсяг резерву; нижче — розв'язку немає.

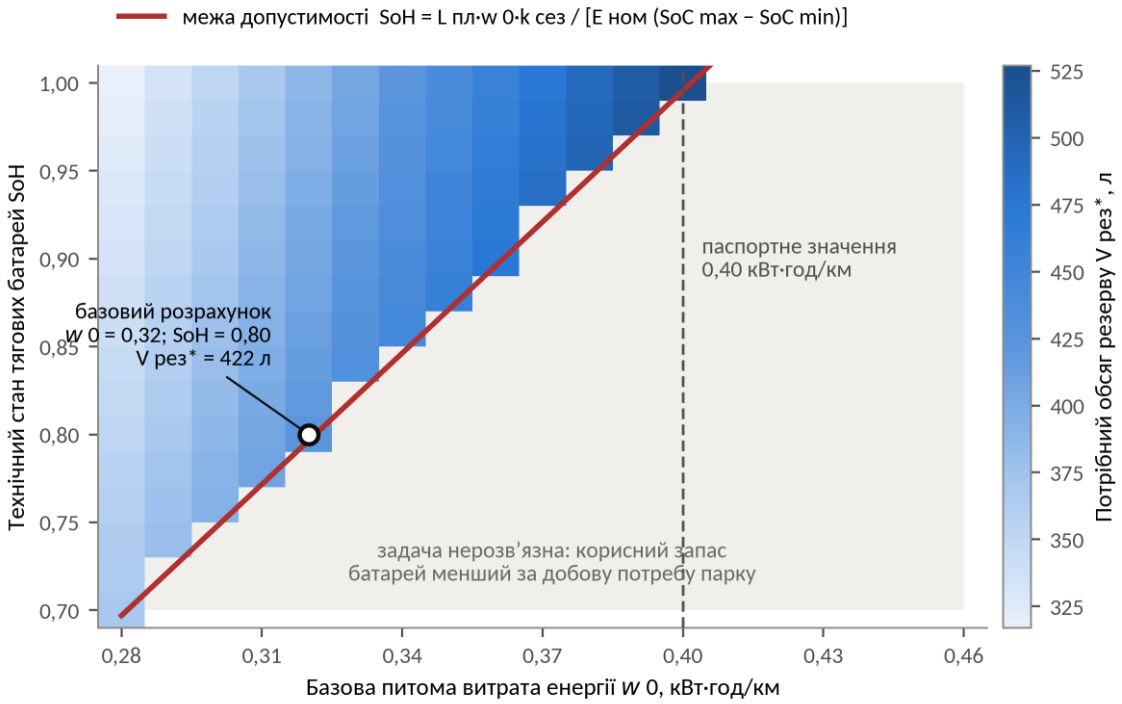


Рисунок 4. Область розв'язності задачі обґрунтування резерву та потрібний обсяг палива залежно від питомої витрати енергії та технічного стану тягових батарей (сценарій С3, $L_{\text{пл}} = 200$ км)

Джерело: розрахунки автора за моделлю, наведеною в додатку. Базовий розрахунок позначено кружком; він розташований практично на межі допустимості.

З виразу (13) випливає практично зручна форма вимоги — гранично допустимий плановий добовий пробіг. Для прийнятої машини він становить 201 км за w_0 = 0,32 і SoH = 0,8, але лише 161 км за w_0 = 0,40 і тому самому технічному стані. Інакше кажучи, за заявленої питомої витрати ту саму конфігурацію парку можна використовувати на маршрутах протяжністю до 160 км на добу, а не до 200 км. Це і є практичний висновок з розбіжності між прийнятим і заявленим значенням: вона обмежує не обсяг резерву, а допустиме транспортне завдання.

Наведені далі значення $V_{\text{рез}}*$ слід читати як розрахунковий мінімум за умовами моделі в межах області розв'язності, а не як експлуатаційну норму забезпечення. Експлуатаційний запас має додатково враховувати невизначеність питомої витрати, технічний стан резервної установки та фактичний режим її роботи; за наявних даних обґрунтувати його кількісно в межах цієї роботи неможливо.

Аналіз чутливості результату

Обсяг резерву, отриманий за виразом (12), залежить від вхідних параметрів, значення яких у практичних розрахунках визначаються з різною точністю. Частина з них є паспортними характеристиками обладнання й відома з високою достовірністю, тоді як питома витрата енергії, потужність фотоелектричної станції за фактичним профілем інсоляції та плановий добовий пробіг залежать від умов застосування й задаються оціночно. Тому потрібно встановити, похибки яких саме величин найсильніше спотворюють результат.

Аналіз виконано однофакторним методом: кожен параметр по черзі відхиляється від базового значення на задану величину за незмінних інших, після чого задача (12) розв'язується повторно за сценарієм С3 і граничним допустимим рівнем технічного стану батарей. Однофакторна схема обрана свідомо: вона не відтворює спільний вплив параметрів, проте дає безпосередню інтерпретаційну відповідь на питання, які вхідні дані потребують уточнення в першу чергу.

Чутливість оцінюється коефіцієнтом еластичності — відношенням відносної зміни потрібного обсягу резерву до відносної зміни параметра:

$$S_x = \frac{\frac{\Delta V_{\text{рез}}^*}{V_{\text{рез}}^*}}{\frac{\Delta x}{x}} \quad (14)$$

де x – досліджуваний параметр.

Значення $S_x > 1$ означає, що похибка вхідних даних підсилюється в результаті, а $S_x < 1$ — що послаблюється. Діапазони відхилень прийнято за очікуваною невизначеністю кожної величини, а не однаковими для всіх параметрів: для паспортних характеристик вони вужчі, для експлуатаційних — ширші (табл. 6).

Таблиця 6. Чутливість потрібного обсягу резерву до вхідних параметрів

Параметр	Познач.	Діапазон	$V_{\text{рез}}$*, л (–/+)	S_x
Базова питома витрата енергії	w_0	±15 %	338 / не існує	асим.
Плановий добовий пробіг	$L_{\text{пл}}$	±20 %	310 / не існує	асим.
ККД заряджання	$\eta_{\text{зар}}$	±5 %	445 / 402	1,02
Питома витрата палива установки	$g_{\text{пит}}$	±10 %	380 / 465	1,01
Потужність приєднання до мережі	$P_{\text{мер}}$	±20 %	422 / 422	0,00
Встановлена потужність ФЕС	$P_{\text{фес}}$	±30 %	423 / 422	0,00
Кількість зарядних станцій	$n_{\text{зар}}$	±1 станція	422 / 422	0,00

Джерело: розрахунки автора за сценарієм С3 і SoH = 0,8 (базове значення 422 л). “Не існує” означає, що за такого відхилення умова $K(d) \geq 1$ не виконується за жодного обсягу резерву.

Технічний стан батарей до цієї таблиці не включено: його вплив розглянуто окремо як самостійний чинник (табл. 4), оскільки SoH є не похибкою вхідних даних, а закономірною зміною властивостей парку протягом строку експлуатації.

Результати розподілилися на три якісно різні групи. Перша — параметри з одиничною еластичністю: ККД заряджання та питома витрата палива установки. Їхня похибка переноситься в результат майже без підсилення й послаблення, оскільки обидва визначають, скільки тягової енергії дає літр палива.

Друга група — параметри, вплив яких асиметричний і розривний: базова питома витрата енергії та плановий добовий пробіг. Їхнє зменшення знижує потребу в резерві (338 і 310 л відповідно), тоді як збільшення на 15 і 20 % робить задачу нерозв'язною за будь-якого обсягу резерву. Причина та сама, що й у попередньому підрозділі: добова потреба парку зростає понад корисний запас батарей за SoH = 0,8, і обмеження переходить з енергозабезпечення на ємність накопичувача. Для цих двох параметрів поняття еластичності втрачає зміст, а практичний висновок сильніший за числову оцінку: похибка в бік завищення пробігу або питомої витрати веде не до збільшення потреби в резерві, а до неможливості виконати норматив.

Третя група — параметри з нульовою чутливістю: потужність приєднання, кількість зарядних станцій і встановлена потужність фотоелектричної станції. Для перших двох це наслідок конфігурації: у режимі роботи на резерві обмежувальною є потужність установки, а не обладнання вузла, тому зміна цих параметрів результату не змінює, доти доки вони не стануть меншими за 80 кВт.

Нульова чутливість до потужності фотоелектричної станції має принципово іншу природу і є наслідком прийнятого вікна заряджання: за профілем інсоляції для м. Одеса станція виробляє 92,1 кВт·год за добу, з яких у вікно заряджання 00:00–08:00 потрапляє лише 1,6 кВт·год, тобто 1,7 %. Отже, за чинного допущення станція входить у розрахункову схему (вираз 6), але на потрібний обсяг резерву практично не впливає за жодних значень своєї потужності. Її роль може стати визначальною лише зі зняттям цього допущення — за дозволу на денне підзаряджання машин, що залишилися в пункті базування, або за введення буферного накопичувача, здатного перенести денну генерацію на нічний період. Кількісне оцінювання цього ефекту є окремим напрямом подальших досліджень.

Практичний висновок аналізу: за прийнятої базової конфігурації точність результату визначають ККД заряджання та питома витрата палива установки, тоді як питома витрата енергії парку та плановий добовий пробіг потребують контролю не за точністю оцінки, а за неперевищенням межі, понад яку завдання стає невиконуваним. Наведені оцінки є локальними: вони не охоплюють спільного впливу параметрів і не поширюються на початковий рівень заряду, профіль відключень та профіль інсоляції, які в цьому аналізі залишалися фіксованими.

Контрольні величини розрахунку

Для перевірки внутрішньої узгодженості наведених результатів у табл. 7 зібрано проміжні величини, з яких складається числовий результат. Кожна з них обчислюється безпосередньо з вихідних даних табл. 2, що дозволяє відтворити логіку розрахунку незалежно від програмної реалізації.

Таблиця 7. Контрольні величини розрахунку

Величина	Значення	Походження
Добова потреба парку в тяговій енергії	441,6 кВт·год	$N \cdot L_{\text{пл}} \cdot w_0 \cdot k_{\text{сез}}$
Те саме за $SoH = 0{,}8$	441,6 кВт·год	не залежить від SoH
Добова потреба зарядного вузла	480,0 кВт·год	441,6 / $\eta_{\text{зар}}$
Корисний запас батарей за $SoH = 1{,}0$	554,4 кВт·год	$N \cdot E_{\text{ном}} \cdot (SoC\ max - SoC\ min)$
Те саме за $SoH = 0{,}8$	443,5 кВт·год	554,4 · 0,8
Запас ємності над добовою потребою за $SoH = 0{,}8$	0,43 %	(443,5 − 441,6) / 441,6
Критичне значення технічного стану	$SoH = 0{,}797$	441,6 / 554,4
Час автономності парку	1,26 доби	554,4 / 441,6
Віддача установки за вікно 8 год, 80 кВт	588,8 кВт·год	$80 \cdot 8 \cdot \eta_{\text{зар}}$
Те саме на 40 кВт	294,4 кВт·год	менше за добову потребу
Питома витрата палива установки	0,294 л/(кВт·год)	23,5 / 80
Потрібний обсяг резерву, $SoH = 1{,}0$	387 л	за критерієм (12)
Потрібний обсяг резерву, SoH = 0,9	405 л	за критерієм (12)
Потрібний обсяг резерву, SoH = 0,8	422 л	за критерієм (12)
Приріст потреби від SoH = 1,0 до 0,8	9,0 %	(422 − 387) / 387
Тривалість роботи установки на 422 л	18,0 год	422 / 23,5

Джерело: розрахунки автора за вихідними даними табл. 2. Технічний стан батарей не впливає на добову потребу парку в тяговій енергії, яка визначається пробігом і питомою витратою, а лише на

корисний запас, доступний для її покриття: за $SoH = 0{,}8$ він становить 443,5 кВт·год замість 554,4. Саме тому зниження SoH збільшує потребу в резерві, не змінюючи добового енергоспоживання.

Зіставлення з парком на дизельному паливі

Зіставлення виконується концептуально – за єдиним показником транспортної спроможності та симетричною тривалістю порушення постачання енергоносія, без введення непідтверджених витратних характеристик дизельного зразка. На відміну від електричного парку, де запас енергії накопичується в тягових батареях і відновлюється через зарядний вузол, у дизельному парку резерв зберігається безпосередньо як пальне в баках машин і на складі запчастин. Повне числове зіставлення потребує паспортних і експлуатаційних даних конкретного зразка, тому кількісного висновку з нього в цій роботі не робиться.

Для коректності порівняння парк на дизельному паливі розглядається за симетричними умовами: порушення зовнішнього постачання енергоносія тієї самої тривалості (затримка підвезення пального на 72 год за сценарієм С3) за наявного запасу на складі частини. Розрахункова схема будується за тією самою логікою, але з заміною енергетичного балансу на паливний. Доступний за запасом палива пробіг машини визначається як

$$L_i^{\text{д}}(d) = \frac{V_i(d) - V_{i\,min}}{g_i(d)} \tag{15}$$

де $V_{\text{і}}\,min$ – незнижуваний залишок, л;

$g_{\text{і}}\,(d)$ – питома витрата палива, л/км, з урахуванням сезонної та режимної поправок.

Запас палива машини оновлюється за виразом

$$V_i(d+1) = min\{V_i(d) - g_i(d) \cdot \ell_i(d) + v_i(d);\ V_{i\,max}\} \tag{16}$$

де $V_{\text{і}}\,(d)$ – обсяг заправки за добу, л, обмежений наявним запасом на складі частини;

$V_{\text{і}}\,max$ – місткість паливних баків, л.

Запас палива на складі частини змінюється як

$$V_{\text{скл}}(d+1) = V_{\text{скл}}(d) - \Sigma_i v_i(d) + V_{\text{підв}}(d) \tag{17}$$

де $V_{\text{підв}}\,(d)$ – обсяг підвезення пального за добу, л, який за сценарієм порушення постачання дорівнює нулю протягом заданого періоду.

Вирази (15)–(17) наведено як специфікацію розрахункової схеми, а не як джерело числового результату: вони визначають, які саме вхідні дані потрібні для зіставлення, і дозволяють виконати його для будь-якого зразка за наявності його паспортних характеристик. Спроможність дизельного парку та частка виконання нормативного обсягу перевезень при цьому обчислюються за виразами (1) і (5) без змін, що й забезпечує зіставність результатів за єдиним показником.

Структурна відмінність двох схем полягає у двох обставинах. По-перше, поповнення запасу пального не обмежене потужністю, аналогічною зарядній: заправка машини триває хвилини, тому за наявності палива на складі парк відновлює запас повністю протягом однієї доби, тоді як електричний парк обмежений сумарною зарядною потужністю вузла й тривалістю нічного періоду. По-друге, для дизельного парку відсутня аналогічна залежність доступного запасу енергоносія від технічного стану тягової батареї — саме та залежність, яка для електричного парку є визначальною.

Такий підхід узгоджується з положенням бойового статуту [1], згідно з яким безперебійне підвезення в сучасній бойовій обстановці не завжди можливе, що й зумовлює утримання військових запасів МтЗ при підрозділах. Отже, для дизельного парку сценарій

затримки підвезення пального є не гіпотетичним, а передбаченим нормативно, і обидва типи парку належать оцінювати за здатністю зберегти спроможність за рахунок місцевого резерву.

Обговорення

Отримані результати узгоджуються з висновком Marqusee і Jenket [25] про те, що резервне джерело живлення не можна вважати безумовно доступним протягом тривалого знеструмлення: у наведених розрахунках межу автономності визначає саме запас палива резервної установки, а не встановлена потужність зарядного вузла. На відміну від оглядів Jasiūnas та ін. [23] і Wang та ін. [34], де стійкість описано показниками стану системи електропостачання, тут її подано через частку виконання нормативного обсягу перевезень, що дає змогу порівняти енергетичне та вуглеводневе забезпечення за єдиним критерієм. Результат щодо узгодження часу заряджання з графіком обмежень за змістом близький до висновку Song та ін. [32] про ефект керування графіком заряджання парку, однак у цьому дослідженні критерієм є не вартість енергії, а збереження спроможності підрозділу. Відмінність від роботи Liu та ін. [24], де електричні транспортні засоби розглянуто як джерело живлення для інших споживачів, полягає в тому, що парк тут залишається споживачем, а предметом обґрунтування є обсяг резерву для самого зарядного вузла.

Методично близьким до розв'язання оберненої задачі є підхід Буратинського та Запорожця [2] до визначення встановленої потужності джерел розподіленої генерації з накопичувачем енергії за заданого рівня забезпечення місцевих споживачів. Відмінність полягає в критерії: там він формулюється через покриття електричного навантаження, тут — через частку виконання нормативного обсягу перевезень, що дає змогу врахувати перенесення дефіциту між добами за рахунок запасу енергії в тягових батареях.

Порівняно з роботами Peterson та ін. [29] і Anuat та ін. [15], де стійкість військового об'єкта також оцінюється через вплив на виконання завдання, предметом цієї статті є підрозділ, спроможність якого визначається станом рухомого складу. Тому показник ураховує не лише доступність енергії, а й здатність парку її накопичувати, а резерв обґрунтовується не під сталий графік навантаження, а під такий, що змінюється залежно від технічного стану накопичувача.

Зіставлення виконано за спроможністю, а не за вартістю, тому воно не залежить від поточних цін на енергоносії. Водночас вартісний вимір посилює практичне значення результату: обидва типи парку потребують місцевого резерву, але резерв дизельного парку формується з енергоносія, ставки акцизу на який підвищуються поетапно [4], тоді як резерв зарядного вузла може бути частково заміщений місцевою генерацією. Кількісне оцінювання цього ефекту виходить за межі статті й потребує окремого техніко-економічного розрахунку.

З отриманих результатів випливають три рекомендації для органів, що здійснюють управління логістичним забезпеченням. Перша стосується порядку обґрунтування: обсяг резервного джерела живлення зарядного вузла слід визначати за граничним допустимим рівнем технічного стану тягових батарей, а не за їх станом на момент введення парку в експлуатацію; інакше запланована автономність може не забезпечуватися після зниження технічного стану батарей до граничного рівня, прийнятого в моделі. Друга стосується форми подання вимоги: обсяг резерву доцільно виражати в розрахунково-постачальних одиницях, прийнятих у системі забезпечення пальним, що дає змогу включити потребу зарядного вузла до планування забезпечення частини без окремої методики. Третя стосується організації повсякденної діяльності: за режимів періодичних обмежень, коли частина доби залишається доступною для заряджання, узгодження часу заряджання парку з графіком обмежень є заходом, який не потребує капітальних витрат і виконується силами підрозділу, тому його доцільно розглядати перед нарощуванням обсягу резерву. За повного знеструмлення такий захід результату не дає, і потреба в резерві визначається виключно запасом палива.

Окремої критичної оцінки потребує розбіжність між прийнятою та заявленою питомою витратою енергії. Прийняте значення 0,32 кВт·год/км узгоджується з власними результатами вимірювань для цього типу машини, тоді як заявлений виробником запас ходу становить 0,40 кВт·год/км за випробувальним циклом. Обидва значення не є помилковими: вони описують різні умови. Проте, як показано виразом (13) і рис. 4, вибір між ними не є вибором між двома оцінками однієї величини — він визначає, чи має задача розв'язок. Це означає, що для практичного застосування схеми питома витрата енергії парку має визначатися вимірюванням в умовах, наближених до фактичних маршрутів підвезення, а не прийматися за паспортом або за аналогією. До отримання таких даних наведені значення резерву слід розглядати як оцінку для сприятливих умов експлуатації.

Так само слід розмежовувати математично обґрунтований мінімум резерву й реальну експлуатаційну потребу. Отримані 387–422 л є найменшим обсягом, за якого модель забезпечує виконання нормативу за прийнятих умов. Експлуатаційна норма має перевищувати цей мінімум щонайменше на величину, що покриває невизначеність питомої витрати, можливу роботу установки на частковому навантаженні (за консервативної оцінки це 24 %) та її технічний стан. Перенесення отриманих числових значень на інші підрозділи без перерахунку за наведеною схемою є неправомірним; перенесенню підлягає схема, а не результат.

Окремо слід зазначити межі застосовності отриманих результатів. Розрахунок виконано для умовного підрозділу з визначеним складом парку та нормативним обсягом підвезення, тому конкретні значення потрібного обсягу резерву не можна переносити на інші підрозділи без перерахунку. Перенесенню підлягає не результат, а розрахункова схема: послідовність етапів, набір вхідних параметрів і спосіб визначення показника не залежать від складу конкретного парку. Для підрозділу з іншим співвідношенням між добовим пробігом, ємністю батарей і потужністю зарядного вузла кількісні висновки будуть іншими, тоді як якісна закономірність — зростання потреби в резерві зі зниженням технічного стану батарей — збережеться.

Обидва типи парку залежать від зовнішнього постачання енергоносія і зберігають спроможність за рахунок місцевого резерву, проте спосіб його утримання принципово відрізняється. У дизельному парку резерв розподілений між машинами і зберігається безпосередньо як пальне, тоді як електричний парк утримує на борту еквівалент 1,26 доби планового пробігу, а решту потребує у вигляді централізованого резерву зарядного вузла обсягом до 422 л за граничного технічного стану батарей, причому з установкою, здатною працювати на номінальній потужності. Відповідно, для електричного парку йдеться не про більший обсяг енергоносія як такого, а про іншу форму його утримання — не в баках машин, а в резерві пункту базування, що й робить обґрунтування цього резерву самостійним завданням логістичного забезпечення.

Водночас дизель-генераторна установка є джерелом теплових та акустичних демаскувальних ознак пункту базування. Досвід підрозділів, що виконують завдання у складі угруповань Збройних Сил України, свідчить про перехід до засобів енергозабезпечення зі зниженою помітністю, зокрема з огляду на застосування противником безпілотних літальних апаратів із тепловізійними засобами [12]. Це є аргументом на користь розгляду як резерву фотоелектричної станції та буферного накопичувача енергії.

Обмеження дослідження. Отримані результати мають сценарний характер: набір сценаріїв прийнято за характерними режимами обмеження електропостачання, статистичного обґрунтування ймовірності їх настання не виконувалося, тому результати не є ймовірнісною оцінкою готовності парку. Розглянуто окремий підрозділ без урахування взаємодії із суміжними підрозділами та можливості перерозподілу завдань між ними. Технічний стан резервної установки прийнято незмінним, відмови обладнання зарядного вузла та демаскувальні ознаки резервної установки не враховувалися. Окремо слід відзначити наслідок допущення про нічне вікно заряджання: за сценарієм С1н спроможність не

відновлюється протягом усього періоду, оскільки денне підзаряджання машин, що залишилися в пункті базування, моделлю не передбачене. Зняття цього обмеження — дозвіл на підзаряджання простою техніки в години наявності живлення — є найближчим напрямом уточнення розрахункової схеми і, за попередньою оцінкою, суттєво пом'якшить саме сценарій С1н. Для сценарію С4, у якому зовнішнє живлення відсутнє протягом усіх дев'яти діб, це припущення безпосередньо не змінює перебігу знеструмлення. Для сценарію С3 це не впливає на самі 72 год повної відсутності живлення, які й визначають потрібний обсяг резерву, проте вплив денного підзаряджання на період після відновлення живлення в режимі С2 потребує окремої перевірки.

Висновки

1. Запропоновано розрахункову схему добового енергобалансу парку електричних транспортних засобів, яка, на відміну від наявних підходів, що оцінюють надійність електропостачання як самостійний показник, пов'язує параметри енергозабезпечення зарядного вузла з часткою виконання нормативного добового обсягу перевезень підрозділом.

2. Встановлено, що за сценарію локального знеструмлення тривалістю 72 год спроможність парку за відсутності резервного джерела живлення падає до нуля з третьої доби, а початковий енергетичний буфер забезпечує 1,26 доби повного нормативного пробігу. Це менше за прийнятий зовнішній орієнтир чотиридобової автономності підрозділу за запасами матеріально-технічних засобів, тому за прийнятих умов транспортна складова не забезпечує такого рівня автономності.

3. Визначено розрахунковий мінімум резервного палива для сценарію С3 за базової питомої витрати енергії: 387 л за $SoH = 1{,}0$, 405 л за $SoH = 0{,}9$ і 422 л за $SoH = 0{,}8$. Ці величини є модельним мінімумом за умовами розрахунку, а не нормою забезпечення: експлуатаційний запас має додатково враховувати невизначеність питомої витрати та режим роботи установки, а за консервативної моделі паливоспоживання установки потреба зростає на 24 %. Зниження технічного стану батарей з 1,0 до 0,8 збільшує потребу на 9,0 %, тому обсяг резерву слід обґрунтовувати за гранично прийнятним рівнем технічного стану батарей. У розрахунково-постачальних одиницях це відповідає 18,0 год роботи агрегату електроживлення на номінальній потужності.

4. Установлено, що для прийнятого режиму заряджання вимога до резервного джерела живлення є двоскладовою, і потужність у ній первинна щодо обсягу палива: за робочої точки 40 кВт віддача установки за вікно заряджання (294,4 кВт·год тягової енергії) менша за добову потребу парку (441,6 кВт·год), тому нормативний рівень не досягається за жодного обсягу резерву; розв'язок існує лише на номінальній потужності 80 кВт. Резерв, обраний лише за обсягом палива, не забезпечує спроможності підрозділу.

5. Отримано замкнену умову допустимості (13), яка пов'язує плановий добовий пробіг, питому витрату енергії та технічний стан батарей і визначає область, у якій задача обґрунтування резерву має розв'язок. Для прийнятої конфігурації та базової питомої витрати критичне значення становить SoH = 0,797, тобто діапазон 1,0–0,8 практично збігається з межею придатності парку; за заявленої виробником питомої витрати 0,40 кВт·год/км критичне значення зростає до 0,996, і конфігурація виконує завдання лише з новими батареями. Наведені критичні значення є характеристиками досліджуваної конфігурації та прийнятих параметрів, а не універсальними величинами.

6. Показано, що за однакової добової тривалості обмеження електропостачання (8 год) перенесення заряджання на доступні години забезпечує виконання 100 % нормативного добового обсягу перевезень протягом усього періоду, тоді як збіг відключення з нічним зарядженням знижує середнє значення показника до 0,09. Отже, режим періодичних обмежень узгодження графіка заряджання є організаційним заходом без капітальних витрат,

який доцільно розглядати перед нарощуванням обсягу резерву; за повного знеструмлення він результату не дає.

7. За результатами однофакторного аналізу чутливості параметри розділилися на три групи. Одиничну еластичність мають ККД заряджання (S_x = 1,02) та питома витрата палива установки (S_x = 1,01). Потужність приєднання, кількість зарядних станцій і встановлена потужність фотоелектричної станції на результат не впливають, причому для станції це наслідок вікна заряджання: у нього потрапляє лише 1,7 % її добового виробітку. Базова питома витрата енергії та плановий добовий пробіг мають асиметричний вплив: їх зменшення знижує потребу в резерві, а збільшення на 15 і 20 % відповідно робить задачу нерозв'язною за будь-якого обсягу резерву. За прийнятої конфігурації та SoH = 0,8 результат можна подати у вигляді питомого співвідношення — 0,96 л резервного палива на кВт·год добової потреби парку; це модельний коефіцієнт для розглянутої конфігурації, а не нормативна величина.

8. Розрахункову схему поширено на парк із двигунами внутрішнього згоряння із заміною енергетичного балансу на паливний, що дає змогу зіставляти два типи приводу за єдиним показником транспортної спроможності без уведення непідтверджених витратних характеристик. Принципова відмінність полягає у формі утримання резерву: у дизельного парку він розподілений по машинах, а доступний запас енергоносія не залежить від технічного стану накопичувача, тоді як для електричного парку резерв є централізованим і його потрібний обсяг зростає зі зниженням технічного стану батарей.

Практичне значення. Отримані результати можуть бути використані органами управління логістичного забезпечення Збройних Сил України під час формування вимог до зарядної інфраструктури та резервних джерел живлення в процесі переоснащення підрозділів електричними транспортними засобами, а також під час планування енергозабезпечення пунктів їхнього базування.

Перспективи подальших наукових досліджень. Перехід до ймовірнісної постановки задачі з використанням статистики перерв електропостачання, розгляд фотоелектричної станції та буферного накопичувача енергії як альтернативних видів резерву, а також поширення розрахункової схеми на групу підрозділів зі спільним зарядним вузлом.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

Використання штучного інтелекту

Під час підготовки рукопису використано мовну модель для формування структури статті та чернетки розрахункової схеми, підготовки чернеткових формулювань окремих фрагментів тексту, а також для пошуку й первинної перевірки джерел. Вихідні дані, розрахунки, інтерпретацію результатів і висновки виконано автором самостійно; автор несе повну відповідальність за зміст рукопису.

Список використаних джерел

1. Логістика Сухопутних військ Збройних Сил України (тактичний рівень) : бойовий статут БП 4-32(11).01 / Командування Сухопутних військ Збройних Сил України. 2021.
2. Буратинський І. М., Запорожець А. О. Метод визначення встановленої потужності електростанцій розподіленої генерації з відновлюваними джерелами енергії та установкою зберігання електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2025. № 1. С. 65. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2025.01.065.

3. Податковий кодекс України : Закон України від 02.12.2010 № 2755-VI (зі змінами). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17.
4. Про внесення змін до Податкового кодексу України щодо імплементації положень актів права Європейського Союзу щодо акцизного податку : Закон України від 18.07.2024 № 3878-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3878-20.
5. Гибало К. Логістичне забезпечення угрупувань військ (сил) ЗС України: досвід, виклики та напрями удосконалення. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України*. 2025. № 3 (86). С. 115–127. DOI: https://doi.org/10.33099/2304-2745/2025-3-86/115-127.
6. Горошко О. Витрати на енергоресурси підготовки військових водіїв на BYD T5 і ГАЗ-66 та потенціал сонячного енергозабезпечення електричного автопарку. *Social Development and Security*. 2026. Т. 16, № 4. С. 453–475. DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.4.27.
7. Горошко О., Завальнюк В. Просторове планування мережі зарядних хабів для важких електровантажівок та перспективи його використання в логістиці Збройних Сил України. *Social Development and Security*. 2026. Т. 16, № 3. С. 341–364. DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.3.22.
8. Гудімов В. В., Максименков Є. А. Транспортно-логістичне забезпечення Збройних Сил України, інших військових формувань під час бойових дій. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2023. № 24. С. 33–39. DOI: https://doi.org/10.15802/tstt2022/272057.
9. Європейська Комісія. Спільний дослідницький центр. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) : база даних. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/uk/ (дата звернення: 26.09.2026).
10. Про затвердження Порядку логістичного забезпечення сил оборони під час виконання завдань з оборони держави, захисту її суверенітету, територіальної цілісності та недоторканності : постанова Кабінету Міністрів України від 2018 р. № 1208. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1208-2018-п.
11. Середні ціни на дизельне паливо в Україні. *Мінфін*. URL: https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/dt/ (дата звернення: 25.09.2026).
12. Саган В., Пономаренко О., Кочеулов А., П'ятков М., Кравчук В. Організація логістичного забезпечення та рекомендації щодо постачання експлуатаційних матеріалів під час дії воєнного стану. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки*. 2025. Т. 98, № 1. С. 57–69. DOI: https://doi.org/10.32453/3.v98i1.1831.
13. Шаповалов О. А., Дерев'янко М. М., Волков П., Яковлев О. О. Оцінка ефективності військових перевезень в системі логістичного забезпечення Національної гвардії України. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2024. № 2 (44). С. 138–142. DOI: https://doi.org/10.33405/2409-7470/2024/2/44/319522.
14. Al-Wreikat Y., Serrano C., Sodré J. R. Effects of ambient temperature and trip characteristics on the energy consumption of an electric vehicle. *Energy*. 2022. Vol. 238. Article 122028. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122028.
15. Anuat E., Van Bossuyt D. L., Pollman A. Energy resilience impact of supply chain network disruption to military microgrids. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7, No. 1. Article 4. DOI: https://doi.org/10.3390/infrastructures7010004.
16. Burke A. F., Zhao J., Fulton L. M., Miller M. Projections of the costs of medium- and heavy-duty battery-electric and fuel cell vehicles (2020–2040) and related economic issues. *Energy for Sustainable Development*. 2023. Vol. 77. Article 101343. DOI: https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101343.
17. Caterpillar Inc. Cat XQP100 rental generator set, EU Stage IIIA: Technical data. 2026. Document No. CM20170119-76401-09975. URL: https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20170119-76401-09975.

18. Du H., Song J., Liu Y., Li C., Lin C. Optimizing charging infrastructure for battery electric trucks in zero-carbon freight corridors under state-of-charge and service-capacity constraints. *Batteries*. 2026. Vol. 12, No. 9. Article 354. DOI: https://doi.org/10.3390/batteries12090354.
19. EVC Energy. Електричний фургон BYD T5 Van: технічні характеристики. URL: https://evc-energy.com/uk/elektromobili-legki-vantazhivki-do-10-ton/158-804-gibridnijelektrichnij-furgon-byd-t5-van.html (дата звернення: 26.09.2026).
20. Gao Y., Wang Y., Sai Q. Estimating energy consumption rates for battery electric truck based on real-world data. *Digital Transportation and Safety*. 2025. Vol. 4, No. 3. P. 207–214. DOI: https://doi.org/10.48130/dts-0025-0020.
21. Gasgoo. BYD releases 2025 T5 light-duty truck. 2025. URL: https://autonews.gasgoo.com/new_energy/70035197.html.
22. Han X., Lu L., Zheng Y., Feng X., Li Z., Li J., Ouyang M. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *eTransportation*. 2019. Vol. 1. Article 100005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.etran.2019.100005.
23. Jasiūnas J., Lund P. D., Mikkola J. Energy system resilience — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 150. Article 111476. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111476.
24. Liu S., Vlachokostas A., Kontou E. Leveraging electric vehicles as a resiliency solution for residential backup power during outages. *Energy*. 2025. Vol. 318. Article 134613. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134613.
25. Marqusee J., Jenket D. Reliability of emergency and standby diesel generators: Impact on energy resiliency solutions. *Applied Energy*. 2020. Vol. 268. Article 114918. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114918.
26. Marqusee J., Becker W., Ericson S. Resilience and economics of microgrids with PV, battery storage, and networked diesel generators. *Advances in Applied Energy*. 2021. Vol. 3. Article 100049. DOI: https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100049.
27. Maznyk L., Dvulit Z., Wołowiec T., Horbal N., Dluhopolskyi O. Energy resilience and sustainability under war: Attacks on Ukraine's critical infrastructure and spillover risks for Europe. *Sustainability*. 2026. Vol. 18, No. 12. Article 6044. DOI: https://doi.org/10.3390/su18126044.
28. Patnala P. K., Regehr J. D., Mehran B., Regoui C. Resilience for freight transportation systems to disruptive events: A review of concepts and metrics. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2024. Vol. 51, No. 3. P. 237–263. DOI: https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0187.
29. Peterson C. J., Van Bossuyt D. L., Giachetti R. E., Oriti G. Analyzing mission impact of military installations microgrid for resilience. *Systems*. 2021. Vol. 9, No. 3. Article 69. DOI: https://doi.org/10.3390/systems9030069.
30. Samet M. J., Liimatainen H., Pihlatie M., van Vliet O. P. R. Levelized cost of driving for medium and heavy-duty battery electric trucks. *Applied Energy*. 2024. Vol. 361. Article 122976. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122976.
31. Simulcik J. D., Villalobos F. E., Bazilian M. D. Electrification of the joint force: Challenges and opportunities for competition in the Pacific and Arctic theaters. *The Electricity Journal*. 2025. Vol. 38, No. 1. Article 107458. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tej.2025.107458.
32. Song S., Qiu Y., Coates R. L., Dobbelaere C. M., Seles P. Depot charging schedule optimization for medium- and heavy-duty battery-electric trucks. *World Electric Vehicle Journal*. 2024. Vol. 15, No. 8. Article 379. DOI: https://doi.org/10.3390/wevj15080379.
33. Tian H., Qin P., Li K., Zhao Z. A review of the state of health for lithium-ion batteries: Research status and suggestions. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 261. Article 120813. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120813.
34. Wang C., Ju P., Wu F., Pan X., Wang Z. A systematic review on power system resilience from the perspective of generation, network, and load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 167. Article 112567. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112567.

References

1. Command of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine. (2021). *Boiovyi statut «Lohistyka Sukhoputnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy» (taktychnyi riven)* [Combat regulations "Logistics of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine" (tactical level)] (BP 4-32(11).01) [in Ukrainian]
2. Buratynskyi, I. M., & Zaporozhets, A. O. (2025). Metod vyznachennia vstanovlenoi potuzhnosti elektrostantsii rozpodilenoi heneratsii z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii ta ustanovkoiu zberihannia elektroenerhii [Method for determining the installed capacity of distributed generation power plants with renewable energy sources and an electricity storage unit]. *Tekhnichna Elektrodynamika*, (1), 65. https://doi.org/10.15407/techned2025.01.065 [in Ukrainian]
3. Verkhovna Rada of Ukraine. (2010). *Podatkovyi kodeks Ukrainy* [Tax Code of Ukraine] (Law of Ukraine No. 2755-VI, as amended). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17 [in Ukrainian]
4. Verkhovna Rada of Ukraine. (2024). *Pro vnesennia zmin do Podatkovoho kodeksu Ukrainy shchodo implementatsii polozhen aktiv prava Yevropeiskoho Soiuzu shchodo aktsyznoho podatku* [On amendments to the Tax Code of Ukraine regarding implementation of European Union law provisions on excise duty] (Law of Ukraine No. 3878-IX). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3878-20 [in Ukrainian]
5. Hybalo, K. (2025). Lohistychne zabezpechennia uhrupuvan viisk (syl) ZS Ukrainy: dosvid, vyklyky ta napriamy udoskonalennia [Logistical support of groupings of troops (forces) of the Armed Forces of Ukraine: Experience, challenges and directions for improvement]. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy*, (3(86)), 115–127. https://doi.org/10.33099/2304-2745/2025-3-86/115-127 [in Ukrainian]
6. Goroshko, O. (2026). Vytraty na enerhoresursy pidhotovky viiskovykh vodiiv na BYD T5 i HAZ-66 ta potentsial soniachnoho enerhozabezpechennia elektrychnoho avtoparku [Energy resource costs of military driver training using the BYD T5 and GAZ-66 and the potential for solar energy supply of the electric vehicle fleet]. *Social Development and Security, 16*(4), 453–475. https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.4.27 [in Ukrainian]
7. Goroshko, O., & Zavalniuk, V. (2026). Prostorove planuvannia merezhi zariadnykh khabiv dlia vazhkykh elektrovantazhivok ta perspektyvy yoho vykorystannia v lohistytsi Zbroinykh Syl Ukrainy [Spatial planning of a charging hub network for heavy electric trucks and prospects for its use in the logistics of the Armed Forces of Ukraine]. *Social Development and Security, 16*(3), 341–364. https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.3.22 [in Ukrainian]
8. Hudimov, V. V., & Maksymenkov, Ye. A. (2023). Transportno-lohistychne zabezpechennia Zbroinykh Syl Ukrainy, inshykh viiskovykh formuvan pid chas boiovykh dii [Transport and logistics supply of the Armed Forces of Ukraine, other military forms during combat operations]. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezen*, (24), 33–39. https://doi.org/10.15802/tstt2022/272057 [in Ukrainian]
9. European Commission, Joint Research Centre. (2026). *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [Database]. Retrieved September 26, 2026, from https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
10. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2018). *Pro zatverdzhennia Poriadku lohistychnoho zabezpechennia syl oborony* [On approval of the Procedure for logistics support of the defence forces] (Resolution No. 1208). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1208-2018-п [in Ukrainian]

11. Minfin. (2026). *Seredni tsiny na dyzelne palyvo v Ukraini* [Average diesel fuel prices in Ukraine]. Retrieved September 25, 2026, from https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/dt/ [in Ukrainian]
12. Sahan, V., Ponomarenko, O., Kocheulov, A., Pyatkov, M., & Kravchuk, V. (2025). Orhanizatsiia lohistychnoho zabezpechennia ta rekomendatsii shchodo postachannia ekspluatatsiinykh materialiv pid chas dii voiennoho stanu [Organization of logistics support and recommendations for the supply of operational materials during martial law]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Seriia: viiskovi ta tekhnichni nauky, 98*(1), 57–69. https://doi.org/10.32453/3.v98i1.1831 [in Ukrainian]
13. Shapovalov, O. A., Derevianko, M. M., Volkov, P., & Yakovlev, O. O. (2024). Otsinka efektyvnosti viiskovykh perevezen v systemi lohistychnoho zabezpechennia Natsionalnoi hvardii Ukrainy [Evaluation of the efficiency of military transportation in the logistics support system of the National Guard of Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy, 2*(44), 138–142. https://doi.org/10.33405/2409-7470/2024/2/44/319522 [in Ukrainian]
14. Al-Wreikat, Y., Serrano, C., & Sodré, J. R. (2022). Effects of ambient temperature and trip characteristics on the energy consumption of an electric vehicle. *Energy, 238*, Article 122028. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122028
15. Anuat, E., Van Bossuyt, D. L., & Pollman, A. (2022). Energy resilience impact of supply chain network disruption to military microgrids. *Infrastructures, 7*(1), Article 4. https://doi.org/10.3390/infrastructures7010004
16. Burke, A. F., Zhao, J., Fulton, L. M., & Miller, M. (2023). Projections of the costs of medium- and heavy-duty battery-electric and fuel cell vehicles (2020–2040) and related economic issues. *Energy for Sustainable Development, 77*, Article 101343. https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101343
17. Caterpillar Inc. (2026). *Cat XQP100 rental generator set, EU Stage IIIA: Technical data* (CM20170119-76401-09975). https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20170119-76401-09975
18. Du, H., Song, J., Liu, Y., Li, C., & Lin, C. (2026). Optimizing charging infrastructure for battery electric trucks in zero-carbon freight corridors under state-of-charge and service-capacity constraints. *Batteries, 12*(9), Article 354. https://doi.org/10.3390/batteries12090354
19. EVC Energy. (2026). *Elektrychnyi furhon BYD T5 Van: tekhnichni kharakterystyky* [Electric van BYD T5 Van: Technical specifications]. Retrieved September 26, 2026, from https://evc-energy.com/uk/elektromobili-legki-vantazhivki-do-10-ton/158-804-gibridnijelektrichnij-furgon-byd-t5-van.html [in Ukrainian]
20. Gao, Y., Wang, Y., & Sai, Q. (2025). Estimating energy consumption rates for battery electric truck based on real-world data. *Digital Transportation and Safety, 4*(3), 207–214. https://doi.org/10.48130/dts-0025-0020
21. Gasgoo. (2025). *BYD releases 2025 T5 light-duty truck*. https://autonews.gasgoo.com/new_energy/70035197.html
22. Han, X., Lu, L., Zheng, Y., Feng, X., Li, Z., Li, J., & Ouyang, M. (2019). A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *eTransportation, 1*, Article 100005. https://doi.org/10.1016/j.etran.2019.100005
23. Jasiūnas, J., Lund, P. D., & Mikkola, J. (2021). Energy system resilience — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150*, Article 111476. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111476

24. Liu, S., Vlachokostas, A., & Kontou, E. (2025). Leveraging electric vehicles as a resiliency solution for residential backup power during outages. *Energy, 318*, Article 134613. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134613
25. Marqusee, J., & Jenket, D. (2020). Reliability of emergency and standby diesel generators: Impact on energy resiliency solutions. *Applied Energy, 268*, Article 114918. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114918
26. Marqusee, J., Becker, W., & Ericson, S. (2021). Resilience and economics of microgrids with PV, battery storage, and networked diesel generators. *Advances in Applied Energy, 3*, Article 100049. https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100049
27. Maznyk, L., Dvulit, Z., Wołowiec, T., Horbal, N., & Dluhopolskyi, O. (2026). Energy resilience and sustainability under war: Attacks on Ukraine's critical infrastructure and spillover risks for Europe. *Sustainability, 18*(12), Article 6044. https://doi.org/10.3390/su18126044
28. Patnala, P. K., Regehr, J. D., Mehran, B., & Regoui, C. (2024). Resilience for freight transportation systems to disruptive events: A review of concepts and metrics. *Canadian Journal of Civil Engineering, 51*(3), 237–263. https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0187
29. Peterson, C. J., Van Bossuyt, D. L., Giachetti, R. E., & Oriti, G. (2021). Analyzing mission impact of military installations microgrid for resilience. *Systems, 9*(3), Article 69. https://doi.org/10.3390/systems9030069
30. Samet, M. J., Liimatainen, H., Pihlatie, M., & van Vliet, O. P. R. (2024). Levelized cost of driving for medium and heavy-duty battery electric trucks. *Applied Energy, 361*, Article 122976. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122976
31. Simulcik, J. D., Villalobos, F. E., & Bazilian, M. D. (2025). Electrification of the joint force: Challenges and opportunities for competition in the Pacific and Arctic theaters. *The Electricity Journal, 38*(1), Article 107458. https://doi.org/10.1016/j.tej.2025.107458
32. Song, S., Qiu, Y., Coates, R. L., Dobbelaere, C. M., & Seles, P. (2024). Depot charging schedule optimization for medium- and heavy-duty battery-electric trucks. *World Electric Vehicle Journal, 15*(8), Article 379. https://doi.org/10.3390/wevj15080379
33. Tian, H., Qin, P., Li, K., & Zhao, Z. (2020). A review of the state of health for lithium-ion batteries: Research status and suggestions. *Journal of Cleaner Production, 261*, Article 120813. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120813
34. Wang, C., Ju, P., Wu, F., Pan, X., & Wang, Z. (2022). A systematic review on power system resilience from the perspective of generation, network, and load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167*, Article 112567. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112567

ДОДАТОК

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ

Наведений нижче код мовою Python реалізує алгоритм погодинного розрахунку та обернену задачу (12). Запуск без аргументів відтворює табл. 3, табл. 4, табл. 5 і контрольні величини табл. 7. Вхідні параметри винесено в клас Params і відповідають табл. 2.

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Погодинна модель добового енергобалансу парку електричних транспортних засобів підрозділу підвозу із зарядним вузлом, що має резервну дизель-генераторну установку.

Реалізує розрахункову схему статті: вирази (1)-(12).
Запуск:  python3 model.py
"""
from dataclasses import dataclass, field
```

```
# ---------------------------------------------------------------- параметри
@dataclass
class Params:
    N: int = 6              # машин у парку
    E_nom: float = 132.0    # кВт·год, номінальна ємність батареї
    soc_max: float = 0.90
    soc_min: float = 0.20
    w0: float = 0.32        # кВт·год/км, базова питома витрата
    k_ses: float = 1.15     # сезонна поправка
    L_pl: float = 200.0     # км/добу, плановий пробіг машини
    P_mer: float = 100.0    # кВт, потужність приєднання
    n_zar: int = 6          # зарядних станцій
    P_zar_max: float = 22.0 # кВт, потужність однієї станції
    P_fes: float = 29.25    # кВт, установлена потужність ФЕС
    fes_kwh_per_kwp: float = 3.15  # кВт·год/кВт на добу (профіль м. Одеса)
    P_dgu: float = 80.0     # кВт, робоча потужність резервної установки
    q_dgu: float = 23.5     # л/год за паспортом при цій потужності
    eta: float = 0.92       # ККД заряджання
    D: int = 14             # діб розрахункового періоду
    night: tuple = (0, 8)   # вікно заряджання: години [0,8) доби
    drive: tuple = (8, 20)  # години руху
    sun:   tuple = (7, 19)  # світлові години

    @property
    def w(self):        return self.w0 * self.k_ses
    @property
    def cap1(self):     return self.E_nom * (self.soc_max - self.soc_min)
    @property
    def need_day(self):  return self.N * self.L_pl * self.w   # кВт·год тягової/добу
    @property
    def P_charge_max(self): return self.n_zar * self.P_zar_max

def pv_profile(p: Params):
    """Погодинна потужність ФЕС, кВт (симетричний денний профіль)."""
    import math
    a, b = p.sun
    daily = p.P_fes * p.fes_kwh_per_kwp
    shape = [math.sin(math.pi * (h - a + 0.5) / (b - a)) if a <= h < b else 0.0
             for h in range(24)]
    k = daily / sum(shape)
    return [s * k for s in shape]

# ---------------------------------------------------------------- сценарії
def grid(p: Params, name: str):
    """chi_mer(t) для кожної з 24*D годин."""
    H = 24 * p.D
    g = [1] * H
    def hours_of(day, rng):     # 1-based day
        return [24 * (day - 1) + h for h in range(*rng)]
    if name == 'C0':
        pass
    elif name == 'C1н':                 # 8 год відсутні, збігаються з вікном
```

```
        for d in range(1, p.D + 1):
            for t in hours_of(d, p.night): g[t] = 0
    elif name == 'С1д':                  # 8 год відсутні поза вікном
        for d in range(1, p.D + 1):
            for t in hours_of(d, (12, 20)):   g[t] = 0
    elif name == 'С2':                   # 16 год відсутні, доступні 8 год у вікні
        for d in range(1, p.D + 1):
            for t in hours_of(d, (8, 24)):    g[t] = 0
    elif name == 'С3':                   # 72 год повної відсутності, далі С2
        for t in range(24, 24 + 72):         g[t] = 0
        for d in range(4, p.D + 1):
            for t in hours_of(d, (8, 24)):
                if t >= 24 + 72:             g[t] = 0
    elif name == 'С4':                   # 9 діб повної відсутності
        for t in range(24, 24 + 216):        g[t] = 0
    else:
        raise ValueError(name)
    return g

# ---------------------------------------------------------------- розрахунок
def simulate(p: Params, scenario: str, soh: float, V_res: float, trace=False):
    cap = p.N * p.cap1 * soh         # корисна ємність парку, кВт·год
    B = cap                          # стартуємо з верхньої межі діапазону
    fuel = V_res
    g = grid(p, scenario)
    pv = pv_profile(p)
    K, log = [], []

    for d in range(1, p.D + 1):
        # --- нічне вікно: заряджання ------------------------------------
        for h in range(*p.night):
            t = 24 * (d - 1) + h
            room = (cap - B) / p.eta                 # кВт·год, які можна відпустити
            if room <= 1e-9:
                continue
            P_av = g[t] * p.P_mer + pv[h]            # мережа + ФЕС
            P_dgu_used = 0.0
            if P_av * 1 < room and fuel > 1e-9:      # потрібна резервна установка
                P_dgu_used = p.P_dgu
            P_supply = P_av + P_dgu_used
            P_zar = min(P_supply, p.P_charge_max, room)   # вираз (7) і (8)
            if P_dgu_used > 0:
                # реально потрібна частка ДГУ у цій годині
                share = max(0.0, P_zar - P_av)
                hours = share / p.P_dgu if p.P_dgu else 0
                need_fuel = hours * p.q_dgu
                if need_fuel > fuel:                 # палива не вистачає
                    hours = fuel / p.q_dgu
                    share = hours * p.P_dgu
                    P_zar = min(P_av + share, p.P_charge_max, room)
                    need_fuel = fuel
                fuel -= need_fuel
            B = min(cap, B + P_zar * p.eta)          # вираз (9)
```

```
        # --- день: рух ----------------------------------------------------
        need = p.need_day
        done = min(B, need)
        k = done / need
        B -= done
        K.append(k)
        if trace:
            log.append((d, round(k, 4), round(B, 1), round(fuel, 1)))
    return K, fuel, log

def V_star(p: Params, scenario: str, soh: float, step: float = 1.0, vmax: float = 4000):
    V = 0.0
    while V <= vmax:
        K, _, _ = simulate(p, scenario, soh, V)
        if min(K) >= 1 - 1e-9:
            return V
        V += step
    return None

# ---------------------------------------------------------------- вивід
if __name__ == '__main__':
    p = Params()
    print(f'Добова потреба парку: {p.need_day:.1f} кВт·год тягової; '
          f'{p.need_day/p.eta:.1f} кВт·год відпущеної')
    print(f'Корисний запас парку (SoH=1,0): {p.N*p.cap1:.1f} кВт·год')
    print(f'Питома витрата палива: {p.q_dgu/p.P_dgu:.4f} л/(кВт·год)')
    print(f'Добовий виробіток ФЕС: {p.P_fes*p.fes_kwh_per_kwp:.1f} кВт·год '
          f'(у вікні заряджання {sum(pv_profile(p)[p.night[0]:p.night[1]]):.1f})\n')

    print('Сценарій  min K  доба  середнє K')
    for sc in ['C0', 'C1н', 'C1д', 'C2', 'C3', 'C4']:
        K, _, _ = simulate(p, sc, 1.0, 0.0)
        mn = min(K)
        print(f'{sc:7s}  {mn:5.2f}  {K.index(mn)+1:4d}  {sum(K)/len(K):9.2f}')

    print('\nПотрібний обсяг резерву за сценарієм C3 (крок 1 л):')
    for soh in (1.0, 0.9, 0.8):
        v = V_star(p, 'C3', soh)
        print(f'  SoH = {soh:.1f}: {v:.0f} л')
```

This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.