

## РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-2(36)-227-241

УДК 621.316.1

**Андрій Миколайович Лось<sup>1</sup>, Олександр Анатолійович Велігорський<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** swarika@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1848-3744>. **ResearcherID:** JHS-7999-2023

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри радіотехнічних та вбудованих систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** o.veligorskiy@stu.cn.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8256-7339>. **ResearcherID:** F-3889-2014

### МЕТОДИКА ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У роботі представлена методика вибору технології акумуляторних батарей, які використовуються як джерело живлення автономної системи спостереження на базі безпілотних літальних апаратів. Уперше запропоновано структуру оцінки, яка включає в себе попередній етап відбору та багатокритеріальний етап прийняття рішень для вибору відповідних технологій накопичення енергії за методом Сааті. Уперше висунута концепція структури оцінки яка включає в себе експлуатаційний, технічний та економічний індекси, кожен з яких, в свою чергу, поділяється на окремі складові. Здійснено моделювання вибору технології акумуляторних батарей для автономної системи спостереження, що базується на визначених експертами вагових коефіцієнтах. Результати моделювання показують, що максимальний загальний індекс мають акумуляторні батареї на основі літій-нікель-марганець оксид та літій-нікель-кобальт-алюміній оксид, а отже, вони є найкращими для даної сфери застосування.

**Ключові слова:** акумуляторна батарея; багатокритеріальна модель ухвалення рішень; Сааті; комплексна оцінка ефективності; автономна система спостереження; безпілотний літальний апарат.

Рис.: 6. Табл.: 3. Бібл.: 25.

**Актуальність теми дослідження.** Безпілотні літальні апарати або дрони знаходять дедалі більше сфер застосування, починаючи від відеозйомки свят до застосування як бомбардувальників або дронів-камікадзе. Однією зі сфер застосування, яка з'явилася порівняно нещодавно, є спостереження з метою охорони, моніторингу розповсюдження пожеж та інших стихійних подій, великомасштабних заходів на відкритому повітрі тощо. Таке спостереження може здійснюватися для окремого об'єкта або ж за певною траєкторією, шляхом обмеженого часу або безперервно. В останньому випадку для забезпечення безперервності спостереження необхідно використовувати кілька дронів (групу), яка буде працювати за певним алгоритмом, коли одні дрони будуть висіти в повітрі для моніторингу ситуації, у той час як інші дрони будуть підзаряджатися на землі, та замінювати ті дрони, які в повітрі, коли їх заряд впаде до мінімального рівня, достатнього для повернення на точку підзарядки. Така система безперервного спостереження може працювати від промислової однофазної мережі 220 В 50 Гц або ж трифазної мережі 380 В 50 Гц, яка буде забезпечувати безперервний потік енергії для заряджання дронів. Однак у випадку використання такої системи в зоні бойових дій, у віддалених регіонах без наявної електричної мережі, необхідно забезпечувати автономне живлення системи, яке може бути здійснене шляхом використання додаткових відновлюваних джерел енергії (наприклад, фотоелектричних перетворювачів), та накопичувача енергії (акумуляторної батареї). У такому випадку актуальним завданням є покращення автономності, оптимізація енергозабезпечення та енергоспоживання, а також зменшення масогабаритних показників та вартості.

Враховуючи те, що різні хімічні складові акумуляторних батарей пропонують різні рівні енергетичної щільності, терміни служби, швидкості заряджання та розряджання, а також різні рівні безпеки, задача вибору оптимальної технології акумуляторних батарей є однією з ключових та актуальною для досягнення оптимальної продуктивності,

економічної ефективності й довговічності системи зберігання енергії, а також підтримки стабільності експлуатації системи безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів.

**Постановка проблеми.** Узагальнена концепція автономної системи безперервного спостереження за допомогою безпілотних літальних апаратів (дронів) включає в себе три підсистеми (рис. 1):

1. Підсистема керування та контролю виконання місій дронами.

Основними завданнями системи є:

- розрахунок необхідної кількості дронів, яку необхідно запустити для виконання місії, а саме – для забезпечення безперервного спостереження;
- ретрансляція каналу керування та передачі даних до користувача;
- оптимізація режимів зарядки акумуляторних батарей дронів з метою найбільш ефективного виконання завдання.

2. Підсистема забезпечення автономності.

Основним завданням системи є забезпечення підсистеми забезпечення живленням достатню кількість енергії з урахуванням тривалих перебоїв. У більшості випадків, для досягнення автономності системи, використовуються відновлювані джерела електричної енергії – фотоелектричні перетворювачі, вітрогенератори.

3. Підсистема забезпечення живленням.

Основним завданнями підсистеми забезпечення живленням є доставка достатньої кількості енергії до підсистеми керування та контролю виконання місій дронами з урахуванням гнучкості системи в напрямку збереження необхідних характеристик безперервного спостереження в цілому. Така підсистема базується на акумуляторних батареях, які накопичують заряд від підсистеми забезпечення автономності, у той час коли виробленої відновлюваними джерелами енергії більше, ніж потрібно для підзарядки дронів, та віддають його, коли такої енергії недостатньо.

Окремо від системи слід виділити пульт керування та контролю користувача, який може включати в себе декілька систем моніторингу, яка існує для узагальнення та керівництва місіями.

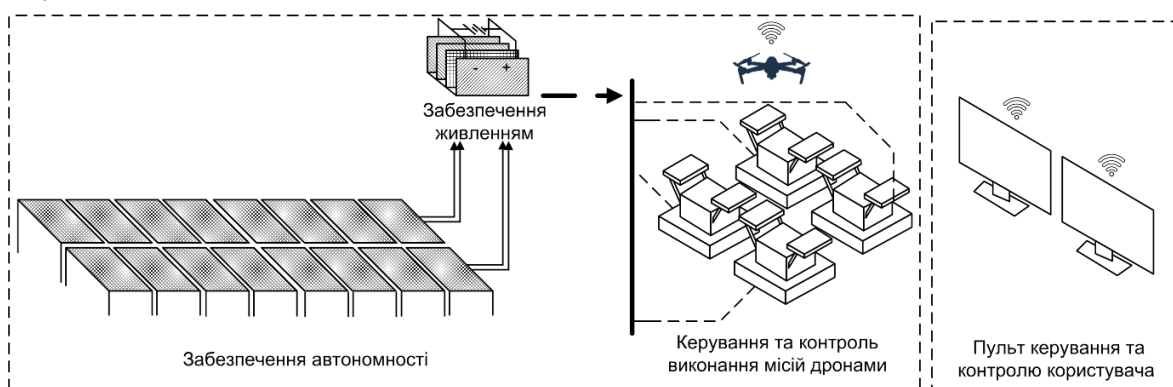


Рис. 1. Узагальнена концепція автономної системи безперервного спостереження за допомогою дронів

Джерело: розроблено авторами.

Враховуючи те, що ключовим елементом у такій системі є акумуляторні батареї, саме від їх вибору залежать техніко-економічні показники автономної системи безперервного спостереження. Постійне вдосконалення електрохімічних джерел енергії, для яких досягаються дедалі більш високі результати в ефективності та безпечності, спонукає багатьох дослідників до розроблення методик порівняння та вибору технологій акумуляторних батарей. Станом на сьогодні є кілька основних груп акумуляторних батарей, які умовно

можна назвати свинцевими, нікелевими, літійевими (за основним матеріалом, який входить до складу батареї), та окремо виділити групу перспективних технологій, які ще не знайшли значного поширення.

З огляду на вищевикладене, станом на зараз є актуальним питання вибору технології акумуляторних батарей для використання як елемент накопичення енергії в системах безперервного спостереження на основі дронів, оскільки саме це впливає на основні техніко-економічні показники системи живлення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням побудови моделей та вибору найкращих технологій акумуляторних батарей як накопичувачів енергії для систем електроживлення різноманітних застосувань науковцями з усього світу приділяється значна увага. Серед значної кількості опублікованих робіт, варто виділити такі отримані результати.

Однією з найбільших станом на сьогодні сфер застосування акумуляторних батарей є *електромобілі*. У роботі [1] авторами було запропоновано метод оцінювання акумуляторних батарей для електромобілів, заснований на нейромережі та параметрах що надали виробники акумуляторних батарей. У статті [2] авторами виділені критерії для оцінки акумуляторних технологій, які використовуються як накопичувач електроенергії в електромобілях та проведено їх техніко-економічне порівняння. У продовження цього питання автори дослідження [3] також розглянули різні технології батарей, у тому числі перспективних, та навели результати порівняльного аналізу, де встановили, що для електромобіля в сучасних умовах найбільш доцільним є використання літій-іонних батарей, однак у найближчому майбутньому вони можуть бути замінені на перспективні, такі як твердотілі та кремнієві акумуляторні батареї. У дослідженні [4] фокус дослідження полягає у хімічному складі основних типів акумуляторних батарей з погляду їх застосування в електромобілях, а також задачах моніторингу та керування процесом розрядки та зарядки таких батарей.

Ще однією сферою застосувань акумуляторних батарей як джерела енергії для основного рушія, є *водні транспортні засоби*. У статті [5] авторами було порівняно основні типи акумуляторних батарей з погляду їхніх хімічних властивостей, ємності, об'ємів, ваги, енергії, питомої енергії, вартості та життєвого циклу за методом TOPSIS, і вибирається найкраща батарея для гібридних рушіїв кораблів. За результатами порівняння було встановлено, що найкращими для такого застосування є літій-залізо-фосфатні акумуляторні батареї.

Значним сегментом застосувань акумуляторних батарей є *системи зберігання енергії у складі електричних систем* (зокрема, мікро- та наномереж). Так, у дослідженні [6] пропонується багатокритеріальна модель ухвалення рішень, яка поєднує підхід нечіткої логіки для створення комплексної системи оцінки технологій акумуляторних батарей для мікромереж, які складаються з вітрогенераторів, фотоелектричних перетворювачів та акумуляторних батарей. За результатами застосування даного методу було встановлено, що найкращими для такої сфери застосувань є літій-іонні акумулятори. На відміну від попередньої роботи, автори статті [7] розглянули можливі технології акумуляторних батарей для накопичувачів енергії у складі мікромереж з погляду мінімальної вартості всієї системи. У свою чергу, автори роботи [8] провели огляд існуючих і нових технологій акумуляторних батарей для великомасштабних накопичувачів енергії, які повинні стати альтернативою гідроакумулятивним електростанціям. Авторами зроблено висновок, що найкращими для такого застосування є натрієві та літій-іонні акумулятори, а нові перспективні типи з високою щільністю енергії все ще не можуть бути застосовані. У дослідженні [9] авторами було проведено порівняльний аналіз гібридної системи електрифікації сільської місцевості в Індії з різними системами резервного накопичення енергії для мікромережі села Коркаду, штат Пудучеррі, Індія, та встановлено, що для такої сфери застосувань

найкращими є літій-іонні акумуляторні батареї. Робота [10] містить моделювання ефективності з'єднаної з мережею системи накопичення електричної енергії на різних типах акумуляторних батарей, та робляться висновки про оптимальне рішення. У дослідженні [11] виконано імітаційну модель і техніко-економічний аналіз літій-іонних і свинцево-кислотних акумуляторів, інтегрованих у фотоелектричну систему, з'єднану з мережею, з урахуванням реальних комерційних профілів навантаження та даних про ресурси. Авторами встановлено, що літій-іонні акумулятори забезпечують нижчу вартість електроенергії в такій системі, що є їх перевагою. Варто також відзначити дослідження [12], де представлено методологію оцінки техніко-економічних показників підключеної до мережі системи зі зберіганням електроенергії за тарифом на електроенергію та часом використання, та встановлено, що й літій-іонні, і свинцево-кислотні батареї поки не можуть бути економічно вигідними в таких системах, однак літій-іонні мають певну перевагу.

Таким чином, проведений аналіз останніх досліджень та публікацій за темою порівняльного аналізу різних технологій акумуляторних батарей в основних сферах їх застосування свідчить про те, що подібна задача вже вирішена, зокрема, для електромобілів, водних транспортних засобів, енергетичних систем з накопичувачами електричної енергії, та мікромереж. За результатами огляду встановлено, що науковцями вже запропоновано різні методи оцінки, включаючи такі, що базуються на нейронних мережах, математичному апараті нечіткої логіки, багатокритеріальних моделях прийняття рішень та техніко-економічному аналізу. Отже, ці результати досліджень надають комплексне розуміння різноманітних критеріїв, які можуть бути використані у процесі відбору, а також прокладають шлях для майбутніх досліджень у сферах інтеграції накопичувачів енергії на базі акумуляторних батарей, зокрема, для відновлюваної енергетики, підкреслюючи важливість розгляду як технічних, так і економічних факторів акумуляторних батарей для ефективного прийняття рішень у плануванні та реалізації автономної енергетичної системи.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Варто зауважити, що аналіз останніх публікацій говорить про те, що хоча й розробці методик вибору технологій акумуляторних батарей для різних застосувань вже присвячена значна увага науковців та запропоновано певні рішення, невирішеними все ще наступні частини проблеми. У роботах [2; 5] основними критеріями методики вибору авторами виділено ціну батареї, значення ваги та об'єму. Однак ці критерії оцінки не включають у себе такі важливі параметри, як, зокрема, безпека застосування, а також вартість експлуатації. У дослідженні [12] найважливішими параметрами системи виділено вартість придбання акумуляторної батареї та кількість циклів до виходу з ладу, які визначають вартість придбання батареї на кВт·г циклу, проте не проаналізовано інші важливі показники системи. Найбільш повним є метод, запропонований у дослідженні [6], де система індексів для методу вибору містила три якісних підкритерії (технологічні, економічні та соціальні), а значення ефективності за ними визначалися висновками експертів. Однак усі зазначені результати отримані або для підключених до мережі електричних систем із накопичувачами енергії, або для таких автономних систем, як транспортні засоби. Отже, питання розробки комплексної методики вибору акумуляторних батарей та її застосування для акумуляторних батарей у складі джерел живлення автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів, які мають низку принципових відмінностей від розглянутих вище, станом на зараз не вирішене. Крім цього, аналіз джерел вказує на необхідність додаткового врахування параметрів безпеки застосування, вартості експлуатації, значення ефективності в аспектах енергозбереження та екологічних викидів для повнішої оцінки акумуляторних батарей в автономних системах загалом.

**Мета статті** полягає в розробці комплексної багатокритеріальної методики оцінювання для вибору технологій акумуляторних батарей, які застосовуються як джерело енергії для автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонована методика оцінки та вибору технологій акумуляторних батарей для застосування їх у складі автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів складається з двох етапів. На першому етапі (етап попереднього відбору) здійснюється відсіювання тих технологій акумуляторних батарей, які не підходять для системи, оскільки не задовольняють найбільш важливим критеріям. На другому етапі здійснюється порівняння всіх тих технологій, які пройшли попередній етап, а отже, можуть бути використані в системі.

### I етап - попередній відбір.

Автономні системи спостереження на базі безпілотних літальних апаратів мають критичні обмеження щодо забезпечення мобільності, а саме щодо максимальної допустимої ваги та об'єму батареї. Для визначення впливу критичних обмежень на систему пропонується використовувати два критерії, а саме мінімальне значення щільності енергії ( $S_{e.min}$ ) та мінімальне значення питомої ваги енергії ( $E_{d.max}$ ). Розрахунок базується на використанні максимальних допустимих значень ваги ( $m_{max}$ ) та об'єму ( $v_{max}$ ) для системи за формулами (1) та (2):

$$S_{e.min} = \frac{E}{m_{max}}; \quad (1)$$

$$E_{d.max} = \frac{E}{v_{max}}; \quad (2)$$

де  $E$  – загальна необхідна енергія для роботи системи впродовж визначеного проміжку часу, Вт\*г.

### II етап - багатокритеріальний відбір.

Після здійснення відсіву тих технологій акумуляторних батарей, які не задовольняють базовим вимогам до системи, необхідно здійснити порівняння всіх попередньо відібраних технологій. Для цього пропонується методика вибору, побудована на багатокритеріальному порівнянні за допомогою методу розрахунку вектора вагових коефіцієнтів за основним методом Сааті [13]. Цей метод не дозволяє групувати критерії для розуміння впливу на систему безперервного моніторингу кожного з них. Враховуючи наведене, було виконано розподілення критеріїв оцінювання та введено індекс для кожного типу батареї за формулою:

$$I_{bat} = E_i + T_i + P_i, \quad (3)$$

де  $E_i$  – експлуатаційний індекс;  $T_i$  – технічний індекс;  $P_i$  – економічний індекс;  $I_{bat}$  – загальний індекс технології акумуляторної батареї.

Кожен із трьох індексів являє собою критерій, значення якого відповідає сумі добуток вагових коефіцієнтів ( $w_i$ ), та величини критерію. Кожен критерій визначаються залежно від впливу на систему безперервного моніторингу.

Для забезпечення коректного порівняння показників, які мають різні одиниці виміру, кожен показник індексу нормалізується до діапазону значень від 0 до 1, нормалізоване значення показника критерію визначається за формулою:

$$N_i = \frac{i_n - i_{min}}{i_{max} - i_{min}}, \quad (4)$$

де  $I_n$  – значення показника;  $i_{min}$  – мінімальне значення показника;  $i_{max}$  – максимальне значення показника.

*Експлуатаційний індекс  $E_i$*  відповідає за фактори батареї, які змінюються залежно від умов експлуатації автономних систем спостереження, та враховує показники:

– діапазон робочих температур  $T_r$ , який повинен враховувати можливості системи безперервного моніторингу функціонувати як у зимну, так і в літню пору року в різних кліматичних умовах;

- показник безпечності  $S_s$ , повинен враховувати можливі випадки аварійного стану батареї через який може статися займання, задимлення або вибух;
- показник саморозряду  $\eta$ , повинен враховувати вплив на батарею довгого невикористання, що призводитиме до зменшення ємності шляхом саморозряду через процеси в середині батареї або на її поверхні.

Експлуатаційний індекс розраховується за запропонованою нижче формулою:

$$E_i = T_r \cdot w_{Tr} + S_s \cdot w_{ss} + \eta \cdot w_{\eta} \quad (5)$$

Для визначення діапазону робочих температур  $T_r$  пропонується використовувати різницю між максимальною  $T_{\max}$  та мінімальною  $T_{\min}$  експлуатаційними температурами, відповідно, за формулою:

$$T_r = T_{\max} - T_{\min} \quad (6)$$

Показник безпечності  $S_s$  є комплексним показником, базуючись на аналізі публікацій, спрямованих на тему безпечності акумуляторних батарей [14-21]. У складі цього показника пропонується врахувати максимальний час безпечної зарядки  $T_s$ , максимальну швидкість розрядки  $T_{sd}$ , максимальну потужність зарядки  $P_{mc}$ . Показник безпечності пропонується розраховувати за формулою:

$$S_s = T_s + T_{sd} + P_{mc} \quad (7)$$

Для визначення показника саморозряду  $\eta$  пропонується використовувати метод визначення необоротних та оборотних втрат ємності батареї, запропонований у [22]:

$$\eta = \frac{C - C_1}{C} \cdot 100\%, \quad (8)$$

де  $C$  – номінальна ємність батареї, Вт\*г;  $C_1$  – ємність розряду, Вт\*г.

Розрахунок експлуатаційного індексу дозволяє отримати дані щодо стійкості батареї до змінних зовнішніх умов експлуатації, технічної досконалості, а також безпечності експлуатації в заданих умовах. У системі безперервного моніторингу експлуатаційний індекс має одне з найважливіших значень, оскільки визначає можливість безперервного використання системи протягом тривалого часу без погіршення її експлуатаційних характеристик та технічних відмов.

Технічний індекс  $T_i$  відповідає за фактори які впливають на технічні характеристики (специфікацію) системи безперервного моніторингу, він враховує показники:

- питомої енергії  $S_e$ , який відповідає за кількість накопиченої в батареї енергії на одиницю ваги батареї;
- показник щільності енергії  $E_d$ , який відповідає за кількість накопиченої в батареї енергії на її об'єм;
- показник життєвого циклу  $L$ , який відповідає максимальну тривалість безперервного використання батареї (цикли “заряд”-”розряд”) в роках;
- показник стабільності номінальної ємності при зміні температури навколишнього середовища  $S_t$ .

Технічний індекс розраховується за наступною запропонованою формулою:

$$T_i = S_e \cdot w_{se} + E_d \cdot w_{ed} + L \cdot w_l + S_t \cdot w_{st} \quad (9)$$

Показник питомої енергії та щільності енергії розраховуються за формулами:

$$S_e = \frac{E}{m}, \quad (10)$$

де  $E$  – кількість накопиченої енергії, Вт\*г;  $m$  - вага батареї, кг,

$$E_d = \frac{E}{l}, \quad (11)$$

де  $l$  – об'єм батареї, м<sup>3</sup>.

Показник життєвого циклу  $L$  розраховується за формулою (12), і залежить від часу заряджання  $C_r$ , розряджання  $D_r$  та гарантійної кількості робочих циклів батареї  $C_l$ . Загальна інформація про життєвий цикл акумуляторної батареї наведена у [23- 25].

$$L = (C_r + D_r) \cdot C_l. \quad (12)$$

Показник стабільності номінальної ємності при зміні температури навколишнього середовища розраховується як температурний коефіцієнт ємності акумуляторної батареї за такою формулою:

$$S_t = \frac{\Delta C}{C_0 \cdot \Delta T} \cdot 100\%, \quad (13)$$

$$\Delta C = C_0 - C_1, \quad (14)$$

$$\Delta T = T_0 - T_1, \quad (15)$$

де  $C_0$ ,  $C_1$  – ємність при  $T_0$  та  $T_1$ , Вт\*г  $T_0$ ,  $T_1$  – поточна (мінімальна) та еталонна температура навколишнього середовища, С.

Розрахунок технічного індексу дозволяє, серед іншого, оцінити об'єктивну інформацію щодо майбутніх розмірів системи безперервного моніторингу та скільки часу система зможе функціонувати в заданих умовах. Для нашої системи технічний індекс може бути пріоритетним над іншими в зв'язку з вимогами щодо мобільності і довготривалості експлуатації.

*Економічний індекс* відповідає за вплив ціни акумуляторної батареї, тобто впливає на загальний бюджет побудови системи, і, відповідно, на можливість реалізації концепції взагалі, та враховує показники:

- вартості батареї  $C_b$ , яка безпосередньо впливає на вартість системи, оскільки ціна батареї може бути головною статтею витрат на побудову системи безперервного моніторингу;
- вартості обслуговування батареї  $C_s$ , показник опосередковано впливає на можливості системи безперервного моніторингу щодо автономності.

Економічний індекс розраховується за такою запропонованою формулою:

$$P_i = C_b \cdot w_{cb} + C_s \cdot w_{cs}. \quad (16)$$

Дані щодо вартості батареї отримуються від виробника, однак вартість обслуговування не наводиться виробником, і тому розраховується індивідуально. Вартість обслуговування в більшій частині залежить від віддаленості системи безперервного моніторингу та якості виконання збірки акумуляторного блоку, можливості заміни окремих елементів у випадку виходу їх з ладу тощо.

Таким чином, II етап дозволяє здійснити багатокритеріальне порівняння можливих варіантів технологій акумуляторних батарей на основі розрахунку розподілених критеріїв оцінки для розуміння впливу на систему кожного з них.

Запропонована методика дозволяє врахувати всі основні техніко-економічні показники акумуляторних батарей, такі як стійкість батареї до змінних зовнішніх умов експлуатації, технічну досконалість, безпечність експлуатації, оцінити відносні майбутні розміри системи безперервного моніторингу. Одночасно методика також враховує показник життєвого циклу, що дозволяє оцінити час функціонування системи безперервного моніторингу в заданих умовах, а також вартість батареї та її обслуговування. Такий підхід є досить ефективним інструментом для аналізу різних акумуляторних батарей.

### **Застосування запропонованої методики оцінки для вибору технології акумуляторних батарей**

#### *Попередній відбір.*

Відповідно до першого етапу вибору виконаємо попередній відбір технологій акумуляторних батарей для їхньої роботи у складі джерел живлення автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів. Спроектована система спостереження виключає можливість збільшення ваги акумуляторної батареї понад 300 кг, а

об'єму 0,12 м<sup>3</sup>. Крім цього, за результатами попередніх розрахунків, які виходять за межі цієї публікації та очікують публікації, встановлено, що необхідна кількість енергії для автономної системи безперервного спостереження становить 25687,3 Вт\*г. Таким чином, отримано значення  $S_{e\_min}$  та  $S_{d\_max}$ :

$$S_{e\_min} = \frac{E}{m_{max}} = \frac{25687,3}{300} \approx 85,5, \text{ В}\cdot\text{г/кг}; \tag{17}$$

$$E_{d\_max} = \frac{E}{v_{max}} = \frac{25687,3}{120} \approx 214, \text{ В}\cdot\text{г/кг}. \tag{18}$$

Використовуючи бази даних про технології акумуляторних батарей [1; 2; 3], на першому етапі методики було виключено ті технології батарей (позначені червоним), які не відповідають за критичними показниками для забезпечення живлення системи безперервного спостереження. Дані відображені на рис. 2 та 3 відповідно.

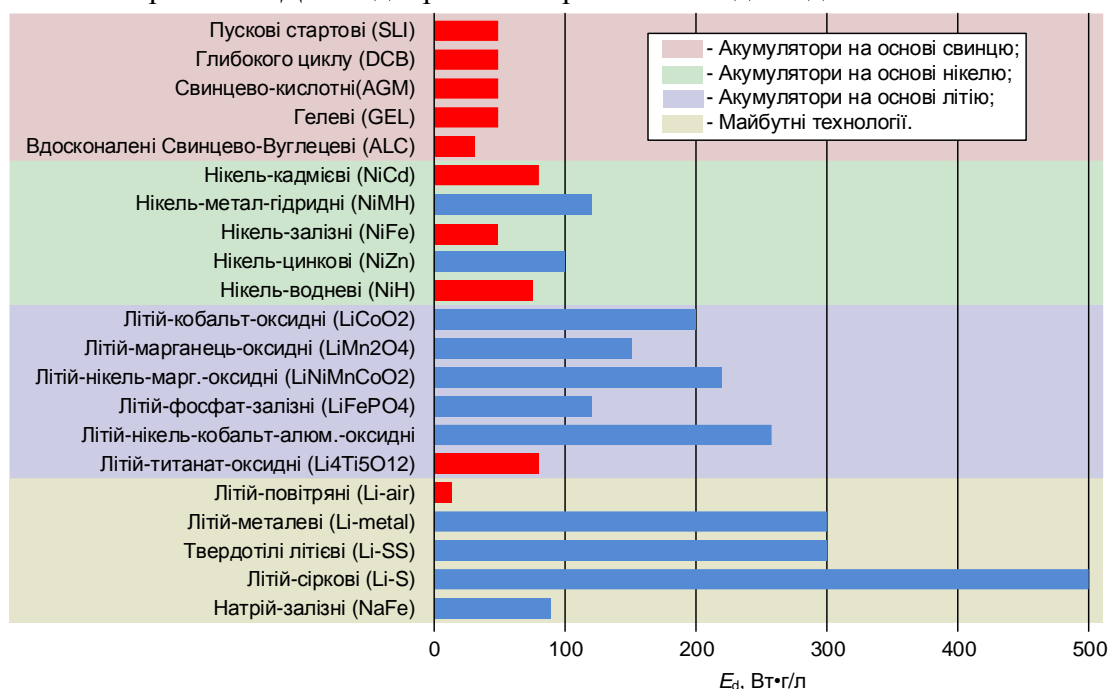


Рис. 2. Значення щільності енергії, В\*г/кг

Джерело: розроблено авторами.

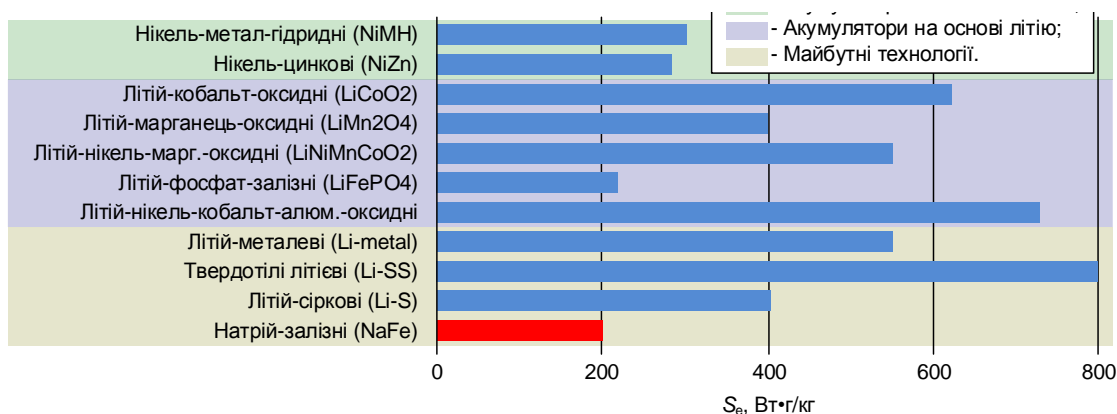


Рис. 3. Значення питомої ваги енергії, В\*г/кг

Джерело: розроблено авторами.



Значення щільності енергії та питомої ваги енергії є наближеними до реальних і можуть змінюватися залежно від конкретного хімічного складу, технології виробництва та інших факторів.

Отримані результати попереднього відбору, згруповані за технологіями, наведені в табл. 1, вони показують, що літєві акумуляторні батареї в більшості є прийнятними для використання, оскільки забезпечують мінімально необхідні технічні показники, в той час, як свинцеві взагалі не підходять для системи безперервного спостереження.

Таблиця 1 – Результати попереднього відбору

Нікелеві	Літєві	Свинцеві	Майбутні
NiMH	LiCoO2	—	Li-metal
NiZn	LiMn2O4	—	Li-S
—	LiNiMnCoO2	—	Li-SS
—	LiFePO4	—	—
—	LiNiCoAlO2 (NCA)	—	—

Джерело: розроблено авторами.

*Застосування багатокритеріального відбору*

Враховуючи те, що для певних перспективних технологій акумуляторних батарей, таких як **літій-металеві** та **натрій-іонні**, у відкритих джерелах станом на зараз відсутня об'єктивна інформація щодо їх параметрів та показників, їх також усунуто від подальшого порівняння. З появою нових даних дана методика повинна бути застосована ще раз, що може призвести у майбутньому до зміни найбільш прийнятної технології для даної сфери застосувань.

Для встановлення вагових коефіцієнтів у методиці було застосовано метод експертних оцінок, результати наведені табл. 2 та нанесено на діаграму (рис. 4).

Таблиця 2 – Вагові коефіцієнти показників

$E_i$		$T_i$		$P_i$	
$w_{tr}$	0,03	$w_{se}$	0,32	$w_{sb}$	0,1
$w_{ss}$	0,23	$w_{ed}$	0,09	$w_{cs}$	0,02
$w_{\eta}$	0,04	$w_l$	0,06	-	-
-	-	$w_{st}$	0,11	-	-

Джерело: розроблено авторами.

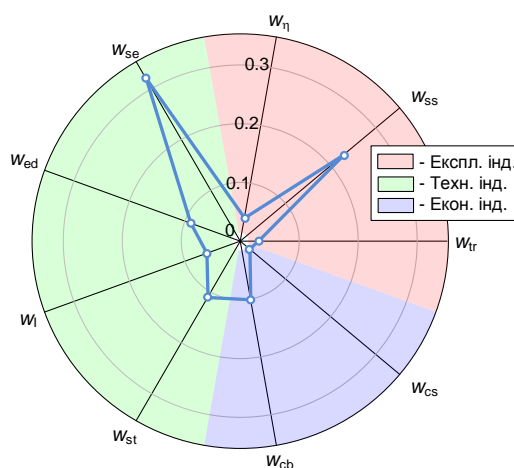


Рис. 4. Дані вагових коефіцієнтів

Джерело: розроблено авторами.

Пріоритет надано показнику питомої енергії з коефіцієнтом 0,32 та показнику безпеки з коефіцієнтом 0,23. Таким чином забезпечуються основні вимоги до системи в мінімальній вазі та максимальній безпеці. Розподіл значень показників по технологіях акумуляторних батарей надано в табл. 3.

За допомогою розробленої методики оцінки, та за результатами моделювання, отримуються значення сум індексів. Чим вище значення суми індексів, тим краще технологія підходить для використання в системі безперервного моніторингу, враховуючи розподіл вагових коефіцієнтів показників, що оцінювались.

Таблиця 3 – Диференційний розподіл значень показників

Параметр	NiMH	NiZn	LiCoO <sub>2</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	LiNiMnCoO <sub>2</sub>	LiFePO <sub>4</sub>	NCA
$T_r, C$	65	70	80	80	80	95	80
$T_r, p.u.$	0	0,167	0,5	0,5	0,5	1	0,5
$T_r \cdot w_{Tr}$	0	0,005	0,015	0,015	0,015	0,03	0,015
$S_s$ (коефіцієнт)	18	9	9	9	9	16	9
$S_s, p.u.$	1	0	0	0	0	0,778	0
$S_s \cdot w_{ss}$	0,23	0	0	0	0	0,179	0
$\eta$ (% на місяць)	15	30	2	2	2	2	2
$\eta, p.u.$	0,464	1	0	0	0	0	0
$\eta \cdot w_{\eta}$	0,019	0,04	0	0	0	0	0
$E_i$	0,249	0,045	0,015	0,015	0,015	0,209	0,015
$S_e, Вт \cdot г/кг$	120	150	200	150	220	120	220
$S_e, p.u.$	0	0,3	0,8	0,3	1	0	1
$S_e \cdot w_{se}$	0	0,096	0,256	0,096	0,32	0	0,32
$E_d, Вт \cdot г/л$	300	250	620	400	550	220	730
$E_d, p.u.$	0,157	0,059	0,784	0,353	0,647	0	1
$E_d \cdot w_{ed}$	0,014	0,005	0,071	0,032	0,058	0	0,09
$L, днів$	500	300	1000	700	2000	2000	500
$L, p.u.$	0,118	0	0,412	0,235	1	1	0,118
$L \cdot w_L$	0,007	0	0,025	0,014	0,06	0,06	0,007
$S_t$ коэф.	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3
$S_t, p.u.$	0	0,5	1	0,5	1	0,5	1
$S_t \cdot w_{st}$	0	0,055	0,11	0,055	0,11	0,055	0,11
$T_i$	0,021	0,156	0,461	0,197	0,548	0,115	0,527
$C_b, y.o. \cdot кВт \cdot г$	300	400	600	500	700	500	800
$C_b, p.u.$	0	0,2	0,6	0,4	0,8	0,4	1
$C_b \cdot w_{cd}$	0	0,02	0,06	0,04	0,08	0,04	0,1
$C_s, y.o. \cdot кВт \cdot г$	150	200	300	250	350	250	400
$C_s, p.u.$	0	0,2	0,6	0,4	0,8	0,4	1
$C_s \cdot w_{cs}$	0	0,004	0,012	0,008	0,016	0,008	0,02
$P_i$	0	0,024	0,072	0,048	0,096	0,048	0,12
$I_{bat}$	0,27	0,225	0,548	0,26	0,659	0,372	0,662

Джерело: розроблено авторами.

Результати моделювання наведено на рис. 5.

Як видно з рис. 5, нікель-метал-гідридні акумуляторні батареї (NiMH) є найкращими для нашого застосування з погляду експлуатаційного індексу, у якому визначальним є показник безпечності. Літій-кобальт-оксидні (LiCoO<sub>2</sub>), літій-марганцевий-оксидні (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), літій-нікель-марганцево-оксидні (LiNiMnCoO<sub>2</sub>), літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні (NCA) акумуляторні батареї – за експлуатаційним індексом показали себе найгірше. Дані щодо безпечності NiMH акумуляторних батарей вказують на їхню стабільність та високу стійкість до неконтрольованого теплового розповсюдження вогню в порівнянні з іншими технологіями.

За відомостями, представленими на рис. 5, літій-нікель-марганцево-оксидні акумуляторні батареї (LiNiMnCoO<sub>2</sub>) та літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні акумуляторні батареї (NCA) видаються найбільш відповідними для нашого застосування з урахуванням технічного індексу, який базується на показнику питомої енергії. Літій-фосфат-залізні

(LiFePO<sub>4</sub>) та нікель-метал-гідридні (NiMH) акумуляторні батареї - мають найнижчі показники питомої енергії, що впливає на безпосередньо вагу акумуляторної батареї, що є одним з найважливіших критеріїв при виборі відповідної технології для автономної системи.

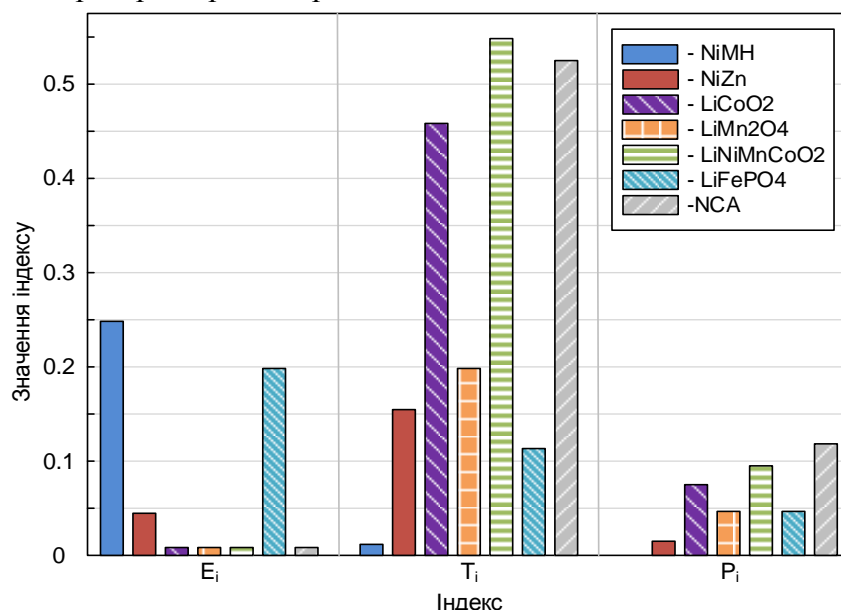


Рис. 5. Результати моделювання

Джерело: розроблено авторами.

Як можна помітити на рисунку 5 літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні акумуляторні батареї (NCA) та літій-нікель-марганцево-оксидні акумуляторні батареї (LiNiMnCoO<sub>2</sub>) мають найвищий економічний індекс безпосередньо на нього найбільше впливає показник ціни батареї. Найнижчим показником ціни і відповідно найдорожчими є нікель-метал-гідридні (NiMH) акумуляторної батареї.

Результати моделювання (рис. 6) показують, що максимальний загальний індекс батареї (суми окремих індексів) мають літій-нікель-марганцеві оксидні акумуляторні батареї (LiNiMnCoO<sub>2</sub>) та літій-нікель-кобальтово-алюмінієві оксидні акумуляторні батареї (NCA).

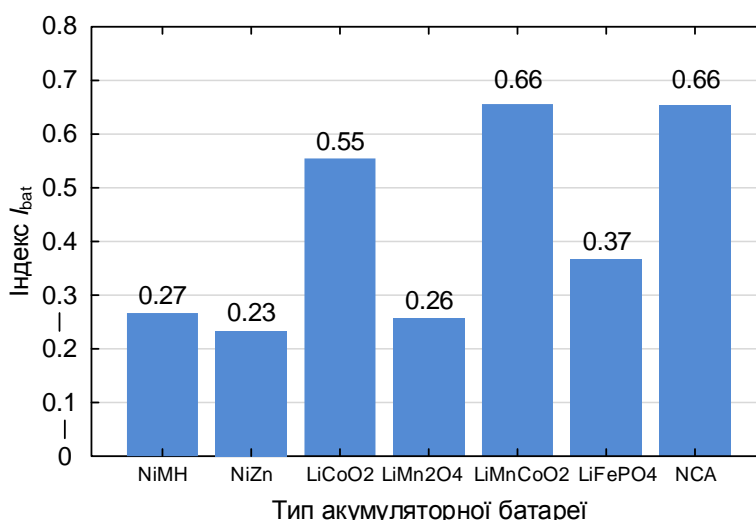


Рис. 6. Результати значень розрахунку загального індексу технології акумуляторної батареї I<sub>bat</sub>

Джерело: розроблено авторами.

**Висновки.** Дослідження нових матеріалів і хімічних речовин підвищує енергетичну щільність, термін служби та безпеку акумуляторів, сприяючи покращенню зберігання енергії та зниженню витрат. З часом враховуючи такий технологічний розвиток в електротехніці призведе до того, що одні технології акумуляторних батарей перестануть використовуватись, а інші стануть основними джерелами живлення з урахуванням потреб споживачів. Вибір оптимальної технології акумуляторної батареї в майбутньому буде визначати продуктивність, економічну ефективність та довговічність загальної системи зберігання енергії.

За результатами аналізу літературних джерел та напрацювань інших авторів, в роботі було представлено методику вибору технології акумуляторних батарей для їх застосування як накопичувачів енергії в системах спостереження на базі безпілотних літальних апаратів. Дана методика включає в себе два етапи. На першому попередньому етапі відбору здійснюється відсів тих технологій, які не підходять за мінімально необхідними техніко-економічними показниками, у той час як на другому етапі здійснюється багатокритеріальний підхід до прийняття рішення з вибору за методом Сааті. Цей підхід базується на трьох запропонованих індексах – експлуатаційному, технічному та економічному. Для здійснення вибору відповідно до необхідних вимог, експертною оцінкою було визначено вагові коефіцієнти складових індексів. За результатами розрахунків загального індексу технології акумуляторної батареї встановлено, що акумуляторні батареї на основі літієво-нікелево-марганцево оксидної та літієво-нікелево-кобальтово-алюмінієво оксидної технології мають найвищі значення індексу, а відповідно, є оптимальними для цієї сфери застосування. Ця методика може бути застосована і для інших сфер застосувань шляхом зміни експертами вагових коефіцієнтів індексів, що робить її універсальною.

#### Список використаних джерел

1. Bukola Peter Adedeji. A Novel Method for Estimating Parameters of Battery Electric Vehicles / Bukola Peter Adedeji // *Intelligent Systems with Applications*. – 2022. – Vol. 15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200089>.
2. Yücenurşen, A. Battery selection criteria for electric vehicles: techno-economic analysis / A. Yücenurşen, A. Samancı // *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*. – 2023. – Vol. 12(2). – Pp. 65-74. DOI: <https://doi.org/10.18245/ijaet.1216888>.
3. Gang Zhao. Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management / Gang Zhao, Xiaolin Wang, Michael Negnevitsky // *iScience*. – 2022. – Vol. 25, Issue 2. – Pp. 103-744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744>.
4. Techniques of battery selection for usage in electric vehicles [Electronic resource] / Devendra Vashist, Anshul Tyagi, Diwakar Bhandari, Ankit Mittal, Manav Rachna // *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*. – 2022. – Vol. 10, Issue 11. – Pp. 359-363. – Access mode: <https://ijcrt.org/papers/IJCRT2211506.pdf>.
5. Bayraktar, M. Multi-Criteria Decision Making using TOPSIS Method for Battery Type Selection in Hybrid Propulsion System / M. Bayraktar, M. Nuran // *Transactions on Maritime Science*. – 2022. – Vol. 11(1). – Pp. 45-53. DOI: <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w02>.
6. Zhao, H. Comprehensive Performance Assessment on Various Battery Energy Storage Systems / H. Zhao, S. Guo, H. Zhao // *Energies*. – 2018. – № 11. – Pp. 28-41. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11102841>.
7. Bruce Dunn. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices / Bruce Dunn, Haresh Kamath, Jean-Marie Tarascon // *Science*. – 2011. – Nov 18; 334(6058). – Pp. 928-935. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1212741>.
8. Soloveichik, Grigorii L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage / Grigorii L. Soloveichik // *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. – 2011. – Vol. 2. – Pp. 503-527. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116>.

9. Optimal Sizing, Selection, and Techno-Economic Analysis of Battery Storage for PV/BG-based Hybrid Rural Electrification System / Murugaperumal Krishnamoorthy, Ajay D. Vimal Raj Periyarayagam, Ch. Santhan Kumar, B. Praveen Kumar, Suresh Srinivasan & P. Kathiravan // *IETE Journal of Research*. – 2022. – Vol. 68. – Pp. 4061-4076. DOI: <https://doi.org/10.1080/03772063.2020.1787239>.

10. A review of modelling approaches to characterize lithium-ion battery energy storage systems in techno-economic analyses of power systems / Anton V. Vykhodtsev, Darren Jang, Qianpu Wang, William Rosehart, Hamidreza Zareipour // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112584>.

11. Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application / Abraham Alem Kebede, Thierry Coosemans, Maarten Messagie, Towfik Jemal, Henok Ayele Behabtu, Joeri Van Mierlo, Maitane Berecibar // *Journal of Energy Storage*. – 2021. – Vol. 40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102748>.

12. Rodolfo Dufo-López. Techno-economic analysis of grid-connected battery storage / Rodolfo Dufo-López, José L. Bernal-Agustín // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – Vol. 91. – Pp. 394-404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.038>.

13. Медиковський, М. О. Дослідження ефективності методів визначення вагових коефіцієнтів важливості / М. О. Медиковський, О. Б. Шуневич // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2011. – № 5. – С. 176-182.

14. Optimal charging strategies in lithium-ion battery / Reinhardt Klein, Nalin A. Chaturvedi, Jake Christensen, Jasim Ahmed, Rolf Findeisen and Aleksandar Kojic // *Proceedings of the 2011 American Control Conference, San Francisco, CA, USA, 2011*. – Pp. 382-387. DOI: 10.1109/ACC.2011.5991497.

15. Mundra, T. S. An Innovative Battery Charger for Safe Charging of NiMH/NiCd Batteries / S. Mundra, A. Kumar // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. – 2007. – Vol. 53, no. 3. – Pp. 1044-1052. doi: 10.1109/TCE.2007.4341584.

16. Liu, C. Toward safe and rapid battery charging: Design optimal fast charging strategies through a physics-based model considering lithium plating / C. Liu, Y. Gao, L. Liu // *Int J Energy Res*. – 2021. – Vol. 45. – Pp. 2303-2320. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.5924>.

17. Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications / K. Zaghbi, M. Dontigny, A. Guerfi, P. Charest, I. Rodrigues, A. Mauger, C.M. Julien // *Journal of Power Sources*. – 2011. – Vol. 196, Issue 8. – Pp. 3949-3954. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.093>.

18. Lithium-ion battery fast charging: A review / Anna Tomaszewska, Zhengyu Chu, Xuning Feng, Simon O'Kane, Xinhua Liu, Jingyi Chen, Chenzhen Ji, Elizabeth Endler, Ruihe Li, Lishuo Liu, Yalun Li, Siqi Zheng, Sebastian Vetterlein, Ming Gao, Jiuyu Du, Michael Parkes, Minggao Ouyang, Monica Marinescu, Gregory Offer, Billy Wu. // *eTransportation*. – 2019. – Vol. 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>.

19. An advanced Lithium-ion battery optimal charging strategy based on a coupled thermoelectric mode / Kailong Liu, Kang Li, Zhile Yang, Cheng Zhang, Jing Deng // *Electrochimica Acta*. – 2017. – Vol. 225. – Pp. 330-344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.12.129>.

20. Al-Haj Hussein A. A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers / A. Al-Haj Hussein and I. Batarseh // in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2011. – Vol. 60, no. 3. – Pp. 830-838. DOI: 10.1109/TVT.2011.2106527.

21. Research on electric vehicle charging safety warning model based on back propagation neural network optimized by improved gray wolf algorithm / Liang Zhang, Tian Gao, Guowei Cai, Koh Leong Hai // *Journal of Energy Storage*. – 2022. – Vol. 49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104092>.

22. Research on a fast detection method of self-discharge of lithium battery / Liao H., Huang B., Cui Y., Qin H., Liu X., Xu H. // *Journal of Energy Storage*. – 2022. – Vol. 55. – P. 105431.

23. BU-214: Summary Table of Lead-based Batteries [Electronic resource] // Battery University. – Mode of access: <https://batteryuniversity.com/article/bu-214-summary-table-of-lead-based-batteries>.

24. BU-215: Summary Table of Nickel-based Batteries [Electronic resource] // Battery University. – Mode of access: <https://batteryuniversity.com/article/bu-215-summary-table-of-nickel-based-batteries>.

25. BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries [Electronic resource] // Battery University. – Mode of access: <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>.

## References

1. Bukola, P. A. (2022). A Novel Method for Estimating Parameters of Battery Electric Vehicles. *Intelligent Systems with Applications, 15*, 200089. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200089>.

2. Yücenurşen, A., Samancı, A. (2023). Battery selection criteria for electric vehicles: techno-economic analysis. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 12(2), 65-74. doi:10.18245/ijaet.1216888.
3. Zhao, G., Xiaolin, W., Negnevitsky, M. (2022). Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management. *iScience*, 25(2), 103744. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744>.
4. Vashist, D., Tyagi, A., Bhandari, D., Mittal, A., Rachna, M. (2022). Techniques of Battery Selection for Usage in Electric Vehicles. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 10(11).
5. Bayraktar, M. & Nuran, M. (2022). Multi-Criteria Decision Making using TOPSIS Method for Battery Type Selection in Hybrid Propulsion System. *Transactions on Maritime Science*, 11. 10.7225/toms.v11.n01.w02.
6. Zhao, H., Guo, S., Zhao, H. (2018). Comprehensive Performance Assessment on Various Battery Energy Storage Systems. *Energies*, 11. <https://doi.org/10.3390/en11102841>.
7. Dunn, B. et al. (2011). Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science* 334, 928-935. DOI:10.1126/science.1212741
8. Soloveichik, G. L. (2011). Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annu Rev Chem Biomol Eng.*, 2, 503-27. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116.
9. Murugaperumal Krishnamoorthy, Ajay D. Vimal Raj Periyanyagam, Ch. Santhan Kumar, B. Praveen Kumar, Suresh Srinivasan & P. Kathiravan (2022). Optimal Sizing, Selection, and Techno-Economic Analysis of Battery Storage for PV/BG-based Hybrid Rural Electrification System. *IETE Journal of Research*, 68(6), 4061-4076. DOI: 10.1080/03772063.2020.1787239.
10. Vykhodtsev, A. V., Jang, D., Wang, Q., Rosehart, W., Zareipour, H. (2022). A review of modeling approaches to characterize lithium-ion battery energy storage systems in techno-economic analyses of power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112584. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112584>.
11. Kebede, A. A., Coosemans, T., Messagie, M., Jemal, T., Behabtu, H. A., Van Mierlo, J., Berecibar, M. (2021). Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application. *Journal of Energy Storage*, 40, 102748. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102748>.
12. Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J. L. (2015). Techno-economic analysis of grid-connected battery storage. *Energy Conversion and Management*, 91, 394-404. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.038>.
13. Medikovskiy M. O., Shunevich O. B. (2011). Doslidzhennia efektyvnosti metodiv vyznachennia vahovykh koefitsientiv vazhlyvosti [Research on the effectiveness of methods for assessing the importance coefficients]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, 2011176.
14. Klein, R., Chaturvedi, N. A., Christensen, J., Ahmed, J., Findeisen, R., Kojic, A. (2011). Optimal charging strategies in lithium-ion battery. *Proceedings of the 2011 American Control Conference* (pp. 382-387). San Francisco, CA, USA. doi:10.1109/ACC.2011.5991497.
15. Mundra, T. S., Kumar, A. (2007). An Innovative Battery Charger for Safe Charging of NiMH/NiCd Batteries. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 53(3), 1044-1052. DOI: 10.1109/TCE.2007.4341584.
16. Liu, C, Gao, Y, Liu, L. (2021). Toward safe and rapid battery charging: Design optimal fast charging strategies thorough a physics-based model considering lithium plating. *Int J Energy Res.*, 45, 2303–2320. <https://doi.org/10.1002/er.5924>.
17. Zaghib, K., Dontigny, M., Guerfi, A., Charest, P., Rodrigues, I., Mauger, A., Julien, C.M. (2011). Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications. *Journal of Power Sources*, 196(8), 3949-3954. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.093>.
18. Anna, Tomaszewska, Zhengyu, Chu, Xuning, Feng, Simon, O'Kane, Xinhua, Liu, Jingyi, Chen, Chenzhen, Ji, Elizabeth, Endler, Ruihe, Li, Lishuo, Liu, Yalun, Li, Siqi, Zheng, Sebastian, Vetterlein, Ming, Gao, Jiuyu, Du, Michael, Parkes, Minggao, Ouyang, Monica, Marinescu, Gregory, Offer, Billy, Wu (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. *eTransportation*, 1, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>.
19. Kailong, Liu, Kang, Li, Zhile, Yang, Cheng, Zhang, Jing, Deng. (2017). An advanced Lithium-ion battery optimal charging strategy based on a coupled thermoelectric model. *Electrochimica Acta*, 225, 330-344. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.12.129>.

20. A. Al-Haj Hussein and I. Batarseh. (March 2011). A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(3), 830-838. doi:10.1109/TVT.2011.2106527.

21. Liang, Zhang, Tian, Gao, Guowei, Cai, Koh, Leong, Hai. (2022). Research on electric vehicle charging safety warning model based on back propagation neural network optimized by improved gray wolf algorithm. *Journal of Energy Storage*, 49, 104092. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104092>.

22. Liao, H., Huang, B., Cui, Y., Qin, H., Liu, X., & Xu, H. (2022). Research on a fast detection method of self-discharge of lithium battery. *Journal of Energy Storage*, 55, 105431.

23. BU-214: Summary Table of Lead-based Batteries. (n.d.). *Battery University*. <https://batteryuniversity.com/article/bu-214-summary-table-of-lead-based-batteries>.

24. BU-215: Summary Table of Nickel-based Batteries. (n.d.). *Battery University*. <https://batteryuniversity.com/article/bu-215-summary-table-of-nickel-based-batteries>.

25. BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries. (n.d.). *Battery University*. <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>.

Отримано 22.04.2024

UDC 621.316.1

**Andrii Los<sup>1</sup>, Oleksandr Veligorskiy<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD student

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [swarika@stu.cn.ua](mailto:swarika@stu.cn.ua). **ORCID** <https://orcid.org/0000-0003-1848-3744>. **ResearcherID:** [JHS-7999-2023](https://orcid.org/0000-0003-1848-3744)

<sup>2</sup> PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of Department of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [o.veligorskiy@stu.cn.ua](mailto:o.veligorskiy@stu.cn.ua). **ORCID** <http://orcid.org/0000-0002-8256-7339>. **ResearcherID:** [F-3889-2014](https://orcid.org/0000-0002-8256-7339)

## METHODOLOGY OF SELECTING BATTERY TECHNOLOGY FOR AUTONOMOUS SURVEILLANCE SYSTEMS BASED ON UAVS

*Unmanned aerial vehicles, or drones, are finding increasingly diverse applications, ranging from capturing footage of events to being utilized as bombers or kamikaze drones. One relatively recent application is surveillance for protection purposes, monitoring the spread of fires and other natural disasters, large-scale outdoor events, and more. Such surveillance can be conducted for individual objects or along specific trajectories, either for a limited time or continuously. In the latter case, to ensure continuous surveillance, multiple drones (a group) need to be used, operating according to a specific algorithm where some drones hover in the air to monitor the situation while others recharge on the ground, replacing those drones in the air whose charge falls to a minimum level sufficient for returning to the charging point.*

*The aim of the article is to develop a comprehensive multi-criteria evaluation methodology for selecting battery technologies used as power sources for autonomous surveillance systems based on unmanned aerial vehicles.*

*Considering that different chemical components of battery cells offer varying levels of energy density, service life, charging and discharging rates, as well as safety levels, the task of selecting the optimal battery technology is one of the key and relevant ones for achieving optimal productivity, economic efficiency, and durability of the energy storage system, as well as supporting the stability of operation of the continuous surveillance system based on unmanned aerial vehicles.*

*The paper presents a methodology for selecting battery technologies used as power sources for autonomous surveillance systems based on unmanned aerial vehicles. For the first time, a selection structure is proposed, which includes a preliminary selection stage and a multi-criteria decision-making stage for choosing appropriate energy storage technologies using the Analytic Hierarchy Process method. A concept of assessment structure is proposed, including operational, technical, and economic indices, each of which is further divided into individual components. Modeling of battery technology selection for an autonomous surveillance system based on expert-defined weighting coefficients is performed. The modeling results indicate that the highest overall indices are achieved by lithium-nickel-manganese oxide and lithium-nickel-cobalt-aluminum oxide batteries, making them the best choices for this application field.*

**Keywords:** battery; multi-criteria decision-making model; Saati; comprehensive performance evaluation; continuous monitoring systems.

*Fig.:* 6. *Tables:* 3. *References:* 25.