

ГІЛЬОРМЕ Тетяна

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

<https://orcid.org/0000-0002-9598-6532>e-mail: gillyorme@i.ua

НАКАШИДЗЕ Лілія

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

<https://orcid.org/0000-0003-3990-6718>e-mail: foton_dnu@ukr.net

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СПОСОБУ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ В ЕНЕРГОУСТАНОВКАХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Актуальною науково-практичною проблемою енергетичного сталого розвитку космічної діяльності є вибір сонячних батарей для безперебійної подачі енергії в енергоустановках космічних апаратів. Проаналізовано експлуатаційні ризики сонячних батарей в умовах космічної діяльності. Запропоновано використовувати методику оцінювання аналітичного ієрархічного процесу забезпечення електротеплого захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів, що дозволяє отримати множину оптимальних варіантів. Обґрунтовано вибір критеріїв щодо вибору параметрів електротеплого захисту сонячних батарей, що враховують специфіку експлуатаційних ризиків енергоустановок у космічному просторі: забезпечення безперебійної роботи сонячних батарей; доступність в обслуговуванні в позаштатних ситуаціях; термін експлуатації сонячних батарей; вартість сонячних батарей; технічна безпека; масогабаритні показники. Обрано п'ять альтернативних варіантів електротеплого захисту сонячних батарей, що на відміну від існуючих, враховує всі фази життєвого циклу при здійсненні космічної діяльності та значно підвищують експлуатаційні характеристики. Аргументовано, що обрана оптимальна альтернатива «Сонячні батареї із захистом на основі запобіжників, що самовідновлюються» дозволить збільшити активний термін експлуатації і, як наслідок, зменшити кількість ремонтів (поточних та капітальних) сонячних батарей в умовах космічної діяльності. Аргументовано, що запровадження цього варіанту можна досягти збільшення експлуатаційних критеріїв: доступність в обслуговуванні в позаштатних ситуаціях на 26%, термін активної експлуатації на 20% та технічна безпека на 24%. В статті означено напрями подальшого розвитку даної методики як можливості розробки сценаріїв функціонування сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів на основі зміни та взаємодії параметрів (концептів).

Ключові слова: сонячна батарея, космічний апарат, електротепловий захист, термін експлуатації, технічна безпека.

HILORME Tetiana, NAKASHYDZE Liliya

Oles Honchar Dnipro National University

TECHNICAL AND ECONOMIC SUBSTANTIATION FOR SELECTION OF THE METHOD OF ELECTROTHERMAL PROTECTION OF SOLAR PANELS IN THE SPACECRAFT POWER PLANTS

An actual scientific and practical problem of the energy sustainable development of space activities is the choice of solar cells for the uninterrupted supply of energy in the power plants of space vehicles. The operational risks of solar cells in the conditions of space activity are analyzed. It is proposed to use the method of evaluating the analytical hierarchical process of providing electrothermal protection of solar cells in power plants of space vehicles, which allows obtaining a set of optimal options. The selection of criteria for the parameters selection of electrothermal protection of solar cells, which take into account the specific operational risks of power plants in outer space, is substantiated: ensuring uninterrupted operation of solar cells; availability of service in extraordinary situations; lifetime of solar cells; the cost of solar panels; technical security; weight and size indicators. Five alternative options for electro-thermal protection of solar cells were chosen, which, unlike the existing ones, take into account all phases of the life cycle during the implementation of space activities and significantly increase operational characteristics. It is argued that the chosen optimal alternative "Solar cells with protection based on resettable fuses" will allow increasing the active service life and, as a result, reducing the number of repairs (current and capital) of solar cells in the conditions of space activities. It is argued that the introduction of this option can achieve an increase in operational criteria: service availability in non-staff situations by 26%, the term of active operation by 20% and technical safety by 24%. The article defines the directions for the further development of this technique as the possibility of developing scenarios for the operation of solar cells in power plants of space vehicles based on the change and interaction of parameters (concepts).

Key words: solar cell, space vehicle, electrothermal protection, service life, technical safety.

Постановка проблеми

Бурхливий розвиток сонячної енергетики сучасності актуалізує науковий пошук у площині розробок енергоефективних технологій як у Космосі, так і на Землі. Одним з ефективних джерел енергії у космічної діяльності є використання сонячної енергії. Функціонування сонячних батарей (СБ) в умовах космосу, космосі, де не існує атмосфери, хмар, зміни дня і ночі, дозволяє отримати сонячної енергії значно більше ніж на земній поверхні [1]. Однак екстремальні чинники функціонування сонячних батарей (СБ) у космосі формує необхідність ретельного обґрунтування параметрів їх вибору конструктивних елементів пристрою, особливо з огляду на елементи захисту від перегріву та перенавантаження.

Необхідно зазначити, що в умовах збільшення потреби у енергії приділяється значна увага розробкам методів і засобів запобігання електричних і теплових перенавантажень в сонячних елементах СБ

[2]. Зокрема, активно розвиваються методичні підходи, які основані на використанні сонячних елементів (СЕ) з низькими напругами зворотного пробою, схемотехнічних рішень із обвідними діодами й активними перемикачами, з врахуванням автоматизованих систем спостереження за електричними параметрами у процесі їхнього функціонування тощо [3–5]. Однак, зазначені підходи не є універсальними та малоефективні. Як правило, ці підходи вимагають складних схемних рішень і значних грошових витрат.

Аналіз останніх джерел

При проведенні контент-аналізу літературних джерел виявлено, що сучасною тенденцією у світі є зростання попиту на підвищення ефективності та надійності таких відновлюваних джерел енергії, як сонячні батареї [6]. Актуальним є пошук і розробка технологій захисту їхніх компонентів від електричних і теплових перенавантажень з метою збільшення терміну служби і недопущення нештатних (зокрема пожежонебезпечних) ситуацій.

На сучасному етапі розвитку технологічної платформи має місце спрямованість інженерно-технічних рішень на розробки надійних, дешевих, технологічних методів і засобів запобігання появи локальних перегрівів електричного походження (зокрема «гарячих плям») в фотоелектричних системах сонячних електростанцій.

На сьогодні наявні декілька напрямків розробки методів і засобів запобігання електричних і теплових перенавантажень в сонячних батареях.

Серед них – удосконалення схемотехнічних технологій на основі обвідних діодів, які включають в себе активні обвідні перемикачі. Обвідні діоди допомагають обмежити максимальну потужність. Але недоліком даного технічного рішення є те, що рівень потужності, яку можливо отримати, залежить від кількості сонячних елементів у рядку підпанелі. Серія рядків з великою кількістю СЕ буде розсіювати більше тепла, ніж рядки з меншою їх кількістю [8]. Тобто, обвідні діоди більш ефективні в усуненні електричних і теплових перенавантажень для коротких довжин рядків СЕ.

Відомі приклади [9] використання обвідних діодів у кожній комірці СБ і вбудовування обвідного діоду в СЕ. Однак при впровадженні зазначеного підходу, тобто додавання дискретних або вбудованих обвідних діодів на рівні окремих СЕ, необхідно проводити економічну оцінку доцільності. Очевидна ймовірність істотного збільшення вартості системи генерування, що важливо як для наземної, так і для космічної енергетичної галузі.

Прикладом такого підходу є активні комутаційні рішення [10], які також скорочують підрядок (підпанель) СЕ при їх обводі. Підхід активного обвідного перемикача зменшує напругу і втрати потужності в лінії СЕ у ситуації струмового обводу й цим самим зменшує ймовірність появи електричних і теплових перенавантажень в сонячних батареях.

Також наявні технології застосування виявлення й активного захисту, які базуються на технологіях відстеження точки максимальної потужності, тобто МРРТ (Maximum Power Point Tracking) компонентів сонячних батарей.

Цей метод спирається на оптимізацію режимів роботи окремих частин СБ. Як приклад такого підходу можна вказати наведені в [11] результати випробувань поведінки окремих ділянок СБ при електричних і теплових перенавантажень при застосуванні центрального та розподіленого МРРТ. Недоліком такого технічного рішення є наявність необхідності проведення оцінювання ефективності для різних умов експлуатації. Так розподілений МРРТ більше ефективним, в умовах затінення більшої поверхні однієї комірки, чим при використанні центрального МРРТ.

Ще один з методів запобігання електричних і теплових перенавантажень в сонячних батареях, це використання сонячних елементів, які мають невеликі амплітуди напруги зворотного пробою, або захист за методом від розімкнутого контуру [12]. Такі СЕ виявляють максимальну потужність розсіювання при повному затіненні. Відомо, що потужність розсіювання пропорційна напрузі пробою. Таким чином, зниження величини пробивної напруги також знижує максимально можливу потужність, що розсіюється в СЕ. Проте СЕ з низькими характеристиками зворотного пробою також стають зворотно зміщеними і розсіюють тепло. Недоліком даного підходу є те, що цей підхід ефективний тільки в тому випадку, коли СЕ розсіює тепло, не викликаючи пошкоджень.

Одним із відомих методів запобігання електричних і теплових перенавантажень в сонячних батареях є використання блокуючих діодів, як елемент стабілізації функціонування фотоелектричних модулів.

Необхідно розглянути основні способи електротеплового захисту сонячних батарей сучасності. Насамперед, за допомогою використання таких технічних засобів: плавкі запобіжники; шунтуючі діоди; запобіжники, що самовідновлюються; шунтуючі та обвідні діоди; обмежувачі напруги та автоматичні запобіжниками.

Насамперед, необхідна розробка електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів з метою підвищення надійності та ефективності елементів комутації. Також актуальними напрямками досліджень є активізація пошуку інноваційних менш затратних та технологічних при обслуговуванні елементів електричного захисту й зменшення масогабаритних показників.

Метою роботи є удосконалення методичного підходу техніко-економічного обґрунтування забезпечення електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів. Це дасть

можливість підвищити ефективність функціонування сонячних батарей в енергоустановках у позаштатних режимах функціонування космічних апаратів.

Основними завданнями є: визначити альтернативні варіанти забезпечення електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів; визначити критерії щодо вибору параметрів забезпечення електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів; виконати багатокритеріальний аналіз забезпечення електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів.

Виклад основного матеріалу

Науковим методом, на основі якого здійснюється вибір альтернативних варіантів сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів, пропонується обрати метод аналізу ієрархій (МАІ, ієрархічного процесу). Запропонований Томасом Сааті ще у 70-і роки минулого століття є актуальним інструментом багатокритеріального аналізу сучасності [7].

Вибір оптимального варіанта електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів здійснюється за допомогою відповідної ієрархічної структури, яка складається, зазвичай, з трьох рівнів. На першому рівні визначається мета – визначення ефективності функціонування СБ в енергоустановках космічних апаратів (КА). На другому рівні окреслюються критерії, за допомогою яких здійснюється оцінка варіантів стосовно виконання мети. На третьому рівні описуються альтернативні рішення щодо забезпечення захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів. Проаналізуємо другий та третій рівні більш детально.

При аналізі та виборі сонячних батарей відповідно до результатів дослідження доцільно враховувати такі критерії параметри (К1–К6).

К1. Забезпечення безперебійної роботи сонячних батарей, надає можливість якісного безперебійного генерування стабільного вихідного струму. Безперервне функціонування пристрою без втрати максимальної потужності. Це визначається через такі показники: забезпечення стабільністю частоти, відсутністю гармонійних спотворень і стрибків по напрузі.

К2. Доступність в обслуговуванні в позаштатних ситуаціях. Позаштатними ситуаціями при експлуатації сонячних батарей в умовах космосу є: не розкриття батарей, пожежа, деформація (вплив космічної погоди, сонячні цикли, метеорити) тощо. Неможливість здійснити ремонт сонячних батарей, особливо сонячних ферм на міжнародній космічній станції, повністю/частково залишає космічні апарати без енергії.

К3. Термін експлуатації сонячних батарей. Якщо сонячні батареї на Землі мають термін експлуатації 3–5 років, то в умовах космосу монокристалічні сонячні батареї мають термін експлуатації 15–20 років. У економічному аспекті необхідно врахувати приведений термін окупності у зміни вартості в експлуатації та обслуговуванні. А саме термін активної експлуатації сонячних батарей.

К4. Вартість сонячних батарей. Вартість створення може бути визначена шляхом підсумовування вартості виготовлення (витрати на створення, випробування та роботи по збірці), експлуатації та обслуговуванні (O&M).

К5. Технічна безпека. Технічна безпека виявляється у збільшенні надійності технічних характеристик складових фотоелектричних модулів через сумарне підвищення надійності: сонячних елементів, елементів захисту, елементів комутації та інженерних конструкцій.

К6. Масагабаритні показники. Основними бажаними результатами забезпечення електротеплового захисту сонячних батарей є: забезпечення суттєвого зменшення масогабаритних розмірів; забезпечення максимальної електричної потужності на одиницю маси. У зв'язку з тим, що сонячні батареї доставляються на орбіту Землі шатлом, виникає проблема існування значення маси корисного вантажу космічного апарату.

Варіант V1. «Сонячні батареї без захисту» є базовим, якщо використовуються додаткові засоби електротеплового захисту сонячних батарей, це варіанти V2–V6.

Варіант 2 (V2). Сонячні батареї захищені плавкими запобіжниками. У роботі [13] розглянуто особливості функціонування плавких запобіжників як пристроїв захисного відключення одноразової дії. Проте використання таких пристроїв в умовах космосу є неефективним. Насамперед, за рахунок малодоступності в обслуговуванні в типових та позаштатних ситуаціях. У роботі [14] зазначено, що більш ефективним пристроєм для захисту електричних ланцюгів фотоелектричних систем від імпульсних перепадів є автоматичні вимикачі. Автоматичні вимикачі, на відміну плавких запобіжників, розраховані на багаторазове спрацювання.

Варіант 3 (V3). Сонячні батареї із захистом на основі запобіжників, що самовідновлюються. У дослідженні [3] запропоновано використання твердотільних комбінованих структур на основі варисторної кераміки, матеріалів з критичними терморезистивними властивостями, позисторних полімерних нанокомпозитів з фазовим переходом. Це дозволить підвищити надійність елементів комутації, що запобігатимуть руйнуванню сонячних елементів, яке виникає при розігріві темновим струмом («гарячі плями», пожежонебезпечні ситуації). Самовідновлювані запобіжники на основі полімерних композитів з нановуглецевими наповнювачами функціонують як багаторазові запобіжники, які не потребують заміни, не мають впливу на роботу фотоелектричної системи сонячної батареї в нормальному режимі і спрацювають, виконуючи функцію розмикання, в позаштатних ситуаціях, пов'язаних з перегрівом. Доцільним є послідовне підключення запобіжників «PolySwitch» до фотоелектричних систем сонячних батарей в їх паралельному

з'єднанні (рядку), що може запобігти аномальній ситуації – повній втраті електричної енергії, що генерується таким рядком, яка може статися при короткому замиканні одного з його модулів.

Варіант 4 (V4). Сонячні батареї захищені шунтуючими діодами. У роботі [4] запропоновано конструкція нових діодів – нові багатошарові комутуючі шини діодів на основі молибдену, завдяки яким діоди витримують понад сімсот термоударів. Проте не здійснено аналізу цих конструкцій в умовах космосу при екстремальній ситуації – досягнення Сонця максимальної сонячної активності.

Варіант 5 (V5). Сонячні батареї захищені шунтуючими та обвідними діодами. Загальний гарантійний термін експлуатації діодів нового покоління становить 20,5 років. Але відповідно до існуючим стандартам/керівним принципам міжнародних організацій у сфері космічної сталої діяльності [15]: максимальний термін служби техніки на орбіті заввишки до 2000 км не повинен перевищувати 25 років. Тому необхідно створювати способи електротеплового захисту СБ, які підвищать термін активної експлуатації діодів до 25 років.

Варіант 6 (V6). Сонячні батареї захищені обмежувачами напруги та автоматичними запобіжниками. Тепловий розчіплювач (біметалічна пластина) працює за температурою, і що вище струм тим вище нагрівання пластини, і швидше час спрацювання. При струмі, що протікає через автомат рівним його номіналу, автомат повинен спрацювати протягом години в залежності від температури. Проте не зазначено взаємозалежність підвищення температури СБ та терміну включення автоматичного запобіжника.

Отже, перший крок методу аналізу ієрархії полягає в декомпозиції та представленні задачі в ієрархічній формі [16]. Тобто ієрархію можна поділити на підієрархії, що мають спільним найвищий елемент. Закон ієрархічної безперервності вимагає: елементи нижчого рівня повинні попарно порівняти відносно елементів наступного рівня до вершини ієрархії.

На другому етапі визначається обґрунтування вибору на кожному рівні за допомогою експертної матриці Т. Сааті за правилом попарного порівняння [7]:

$$\begin{cases} K_1 = K_2, K_1 = K_3 \\ 2K_2 = 5K_3 \vee K_2 = 5/2K_3 \rightarrow \\ K_3 = 2/5K_2 \\ \frac{K_2}{K_3} = \frac{5}{2}, \frac{K_3}{K_2} = \frac{2}{5} \end{cases}, \tag{1}$$

де $K_i - i$ -е значення порівняльного критерію.

Після розрахунків за (1), будується матриця попарних порівнянь у табличному вигляді. Потім, для подальшого складання скалярного ланцюга, визначається той чинник, який отримує максимальну кількість балів у Матриці попарних порівнянь.

Процедура методу аналітичного ієрархічного процесу має вбудований критерій якості вибору параметрів – індекс узгодженості (IC). Він надає інформацію стосовно ступеню порушення чисельної (кардинальної) та транзитивної (порядкової) узгодженості суджень. Індекс узгодженості Матриці попарних порівнянь визначається (IC) [16]:

$$IC = \frac{\lambda - m}{m - 1}, \tag{2}$$

де IC – індекс узгодженості;

λ – власне число;

m – кількість порівнювальних критеріїв.

У табл. 1 розглянуто основні критерії вибору варіантів сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів на основі обраних варіантів та показників.

Таблиця 1

Критерії вибору варіантів сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів

№ п/п	Критерії	Варіанти сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів					
		V1	V2	V3	V4	V5	V6
1	Забезпечення безперебійної роботи сонячних батарей	1,0	1,08	1,32	1,12	1,24	1,22
2	Доступність в обслуговуванні в позаштатних ситуаціях	1,0	1,06	1,26	1,14	1,13	1,18
3	Термін експлуатації сонячних батарей, роки	15	15	20	18	18	17
4	Вартість сонячних батарей, доларів/кв. м	105	107	125	130	140	120
5	Технічна безпека, частка	1,0	1,05	1,24	1,1	1,15	1,1
6	Масогабаритні показники, частка	1,0	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3

Джерело: авторські розрахунки

Необхідно зазначити наступне стосовно показників. Критерії K4– K6 визначаються за таким постулатом. Як базовий варіант, V1 має величину критеріїв K4–K6 за (1). Зміни варіантів V2–V6 це сума

базового варіанту та зміна відповідних показників. Аналітично можна подати у такому вигляді: $1 \pm$ зміна частки. Наприклад, якщо критерій К4 змінюється на 10%, то у кінцевому вигляді: $1+0,1=1,1$ (частка).

Обмеження тривалого існування космічної техніки на навколоремних орбітах вимагає розв'язання багатокритеріального аналізу визначення критеріїв вибору варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів.

Результати побудови матриці критеріїв вибору варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів у табл. 2. Розрахунок відбувається за (1).

Таблиця 2

Матриця критеріїв вибору варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів

Критерії	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Оцінка компонента власного вектора	Нормалізовані оцінки векторів пріоритетів
K1	1	9	3	0.333	0.333	0.5	1.0696	0.1299
K2	0.111	1	0.125	0.111	0.111	0.143	0.1704	0.0207
K3	0.333	8	1	0.333	0.25	2	0.8734	0.1061
K4	3	9	3	1	0.3333	2	1.9445	0.2362
K5	3	9	4	3	1	3	3.1479	0.3824
K6	2	7	0.5	0.5	0.333	1	1.0260	0.1246
Сума							8	X

Джерело: авторські розрахунки

Здійснено ранжування критеріїв вибору варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів. 1 ранг – K5 (0,3824); 2 ранг – K4 (0,2362); 3 ранг – K6 (0,1299); 4 ранг – K1 (0,1246); 5 ранг – K2 (0,1061); 6 ранг – K3 (0,0207). Необхідно зазначити, що критерії «Вартість сонячних батарей» та «Масогабаритні розміри» оптимумом мають мінімальне значення. Інші чотири критерії – максимальне значення.

Об'єктивність оцінки критеріїв визначається відношенням узгодженості (AR) [7]:

$$AR = \frac{IC}{AM} \times 100\%, \quad (3)$$

де AR – відношення узгодженості;

AM – середні узгодженості для випадкових матриць різного порядку.

Наприклад, значення показника AM матриці 6×6 дорівнює 1,24.

Відповідно до [22] повинна виконуватися умова: $AR \leq 10\%$.

Здійснено об'єктивність оцінки критеріїв вибору варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів. Індекс узгодженості матриці, розрахований за (2), складає 0,116, тоді відношення узгодженості, розрахований за (3), 9,33%. Виконується умова: $9,33\% < 10\%$.

Таблиця 3

Матриця порівняння варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів за критерієм K1 «Забезпечення безперебійної роботи сонячних батарей»

Варіанти	V1	V2	V3	V4	V5	V6	Оцінка компонента власного вектора	Нормалізовані оцінки векторів пріоритетів
V1	1	2	6	2	3	0.25	1.6189	0.1791
V2	0.5	1	3	1	2	0.1429	0.8683	0.0961
V3	0.1667	0.333	1	0.25	0.5	0.1111	0.3028	0.0335
V4	0.5	1	4	1	2	0.1667	0.9347	0.1034
V5	0.333	0.5	2	0.5	1	0.125	0.5246	0.0580
V6	4	7	9	6	8	1	4.7912	0.52997
Сума							9.040	X

Джерело: авторські розрахунки

За кожним із шістьох критеріїв вибору варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів необхідно побудувати відповідні матриці порівняння. Розрахунок відбувається за (1). У зв'язку з тим, що для всіх критеріїв розрахунок ідентичний, у якості прикладу наведемо тільки результати порівняння варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках

космічних апаратів за критерієм К1 «Забезпечення безперебійної роботи сонячних батарей» (табл. 3).

Здійснено ранжування порівняння варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів за критерієм К1 «Забезпечення безперебійної роботи сонячних батарей». 1 ранг – V6 (0,52997); 2 ранг – V1 (0,1791); 3 ранг – V4 (0,1034); 4 ранг – V2 (0,0961); 5 ранг – V5 (0,0580); 6 ранг – V3 (0,0335).

Здійснено об'єктивність оцінки порівняння варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів за критеріями К1-К6 (рис. 1).

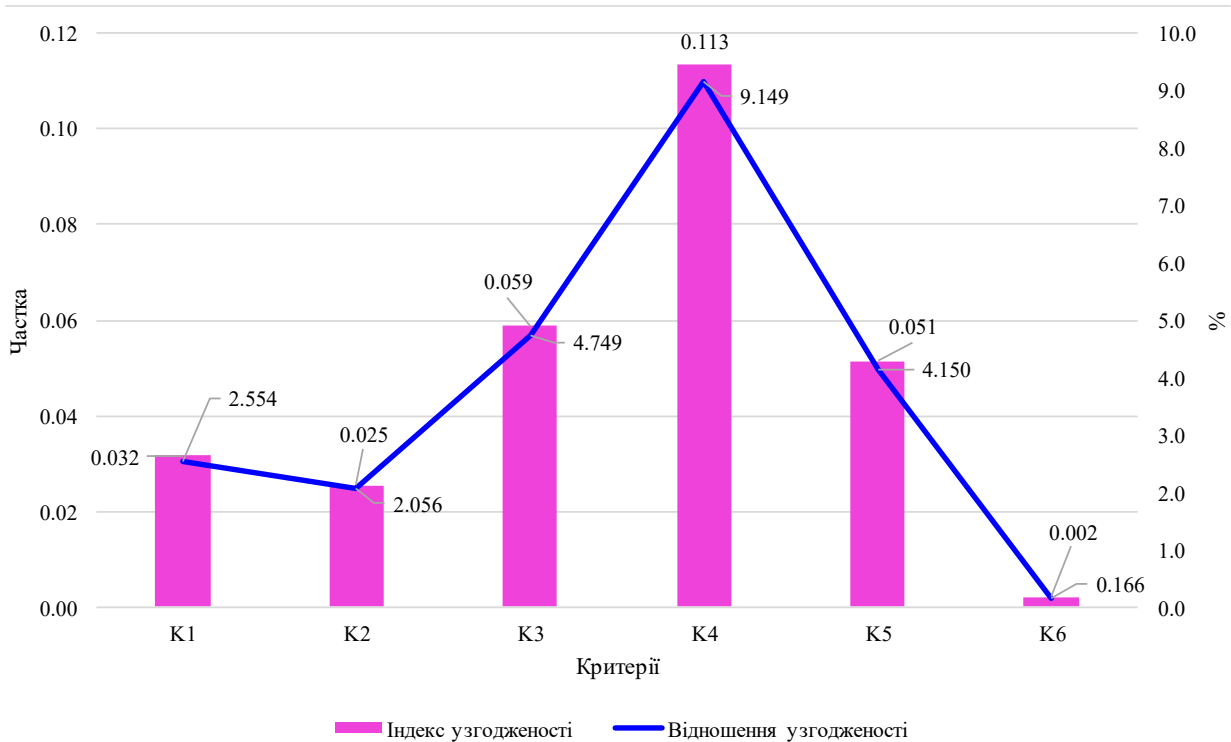


Рис. 1. Результати розрахунку індексу узгодженості (IC) та відношення узгодженості (AR) для критеріїв вибору варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів

Джерело: розроблено авторами

Відповідно до результатів індексу узгодженості (IC) та відношення узгодженості (AR) для критеріїв вибору варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів (рис. 1) можна зробити такий висновок. Для всіх розрахованих показників відношення узгодженості виконується умова $AR \leq 10\%$.

Визначення глобальних пріоритетів критеріїв вибору варіантів визначається (K^g) [16]:

$$K^g = \sum_{i=1}^m B_{norm} \times B_e. \tag{4}$$

де K^g – глобальний пріоритет критеріїв вибору варіантів;
 B_{norm} – нормалізована оцінка векторів пріоритетів критеріїв;
 B_e – оцінка компонента власного вектору критерію.

Обирається альтернативний варіант, який відповідає умові: $K^g \rightarrow \max$.

Результати визначення глобальних пріоритетів критеріїв вибору варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів у табл. 4. Розрахунок відбувається за (4).

Здійснено ранжування вибору альтернативних варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів. 1 ранг – «V3» (0,2928); 2 ранг – «V2» (0,1791); 3 ранг – «V4» (0,1549); 4 ранг – «V6» (0,1562); 5 ранг – «V1» (0,1189); 6 ранг – «V5» (0,0981).

Необхідно зазначити, що критерії «Вартість сонячних батарей» та «Масогабаритні розміри» оптимумом мають мінімальне значення. Інші чотири критерії – максимальне значення.

Здійснене ранжування критеріїв вибору варіанта V3 сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів показало такі результати. 1 ранг – К5 (0,423); 2 ранг – К6 (0,3752); 3 ранг займають два параметра К4 (0,2424); 4 ранг – К3 (0,2062); 5 ранг – К2 (0,0365); 6 ранг – К1 (0,0335). Тобто, за даними побудованої матриці параметрів вибору варіантів сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів (табл. 2) кореспондує відповідність рангів за таким критерієм: 1 ранг – «Технічна безпека». Це дійсно, пріоритетний критерій при виборі варіанта сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів.

Визначення глобальних пріоритетів критеріїв вибору варіантів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів

Альтернативні варіанти	Критерії						Глобальні пріоритети
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	
	Чисельне значення вектору пріоритету						
	0.1299	0.0207	0.1061	0.2362	0.3824	0.1246	
V1	0.1791	0.1047	0.1636	0.1375	0.0820	0.0984	0.1189
V2	0.0961	0.1047	0.1636	0.1375	0.2355	0.1968	0.1791
V3	0.0335	0.0365	0.2062	0.2424	0.4230	0.3752	0.2928
V4	0.1034	0.1128	0.1067	0.1775	0.1604	0.1968	0.1549
V5	0.0580	0.0633	0.1076	0.1786	0.0612	0.0984	0.0981
V6	0.5300	0.5780	0.2523	0.1265	0.0379	0.0344	0.1562

Джерело: авторські розрахунки

При цьому кількісний розрив за критеріями відповідно до даних табл. 2, 3 (оптимальний варіант V3) складає: K1 +0,0964; K2 -0,0159; K3 -0,1001; K4 -0,0062; K5 -0,0406; K6 -0,2505 (рис. 2). Загальний розрив критеріїв складає -0,3167.

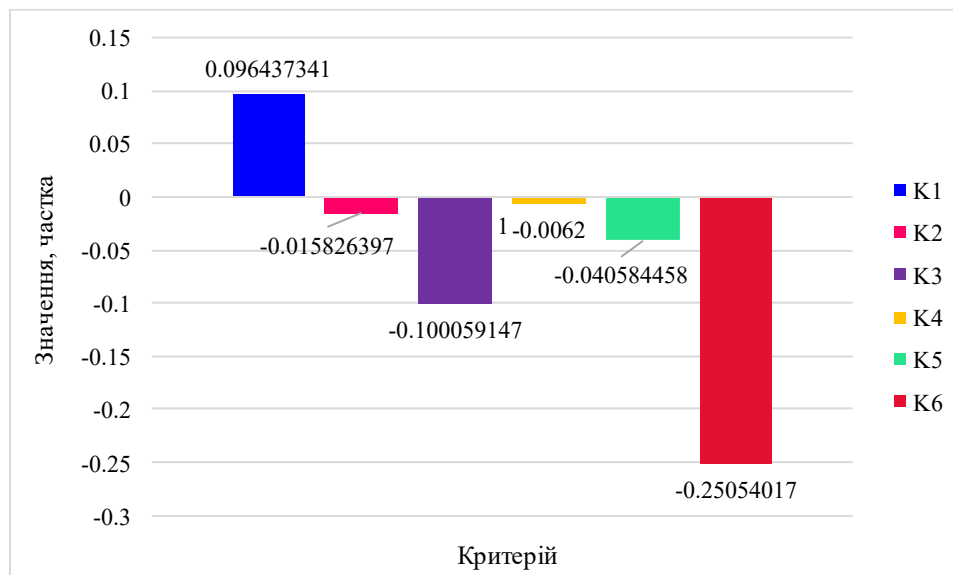


Рис. 2. Кількісний розрив за глобальними пріоритетами оптимальної альтернативи (V3) та нормалізованого вектору критеріїв
Джерело: розроблено авторами

Це свідчить про те, що параметри вибору варіанта V3 сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів показало такі результати, які незначно менше (31,67%) нормалізованої оцінки векторів пріоритетів.

Висновки

Визначено критерії щодо вибору параметрів електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів: забезпечення безперебійної роботи сонячних батарей; доступність в обслуговуванні в позаштатних ситуаціях; термін експлуатації сонячних батарей; вартість сонячних батарей; технічна безпека; масогабаритні показники. Саме ці критерії дозволяють оцінити ефективність функціонування СБ в умовах космічної діяльності.

Обрано п'ять альтернативних варіантів електротеплового захисту сонячних батарей: захищені плавкими запобіжниками; із захистом на основі запобіжників, що самовідновлюються; захищені шунтуючими діодами; захищені шунтуючими та обвідними діодами; захищені обмежувачами напруги та автоматичними запобіжниками. Ці варіанти дозволяють здійснювати електротепловий захист на весь період активної експлуатації та підвищувати експлуатаційні параметри базових СБ.

Виконано багатокритеріальний аналіз забезпечення електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів. Це дозволило обрати найефективніший альтернативний варіант, а саме – сонячні батареї із захистом на основі запобіжників, що самовідновлюються. Здійснено ранжування розрахованих критеріїв щодо вибору параметрів та визначено кількісний розрив глобальних пріоритетів. Це

дозволяє здійснити поглиблене оцінювання рівня пріоритетності альтернативних варіантів з їх подальшою градацією на підставі отриманих результатів.

References

1. Abdmouleh Z., Gastli A., Ben-Brahim L., Haouari M., and Al-Emadi N. A. Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources. *Renewable Energy*, vol. 113, P. 266–280, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>
2. Nakashidze L., Hilorme T., and Nakashydzhe I. Substantiating the criteria of choosing project solutions for climate control systems based on renewable energy sources. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 3 (105), P. 42–50, 2020. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.201527>
3. Nakashydzhe L., Gabrinets V., Mitikov Y., Alekseyenko S., and Liashenko I. Determination of features of formation of energy supply systems with the use of renewable energy sources in the transition period. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, no. 8(113), P. 23–29, 2021. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243112>
4. Chang R. D., Zuo J., Zhao Z. Y., Zillante G., Gan X. L., and Soebarto V. Evolving theories of sustainability and firms: History, future directions and implications for renewable energy research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, P. 48–56, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.029>
5. Xu X., Wei Z., Ji Q., Wang C., and Gao G. Global renewable energy development: Influencing factors, trend predictions and countermeasures. *Resources Policy*, vol. 63, 101470, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101470>
6. Ibiidunni A. S., Ogunnaiké O. O., and Abiodun A. J. Extending the knowledge strategy concept: linking organizational knowledge with strategic orientations. *Academy of Strategic Management Journal*, vol. 16, no. 3, 2017. URL: <http://eprints.covenantuniversity.edu.ng/11867/#.XsJBdYgzZPZ>
7. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, vol. 1, no. 1, P. 83–98, 2008.
8. Acciari G., Graci D., and La Scala A. Higher PV module efficiency by a novel CBS bypass. *IEEE transactions on power electronics*, vol. 26, no. 5, P. 1333–1336, 2010. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2095469>
9. Solórzano J., and Egido M. A. Hot-spot mitigation in PV arrays with distributed MPPT (DMPPT). *Solar Energy*, vol. 101, P. 131–137, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.020>
10. Che L., Zhang X., Shahidehpour M., Alabdulwahab A., and Abusorrah A. Optimal interconnection planning of community microgrids with renewable energy sources. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 3, P. 1054–1063, 2017. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2456834>
11. Karabegović I., and Doleček V. Development and Implementation of Renewable Energy Sources in the World and European Union. *Contemporary materials*, vol. 2, no. 6, P. 130–148, 2017. <https://doi.org/10.7251/COMEN1502130K>
12. Ghimire L. P., and Kim Y. An analysis on barriers to renewable energy development in the context of Nepal using AHP. *Renewable energy*, vol. 129, P. 446–456, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.011>
13. Nakashydzhe L. V., Gabrinets V. O., Tytarenko I. V., Hilorme T. V., Sokol G. I., Tonkoshkur S. O. etc. Providing energy-saving technologies: technical, ecological and economic aspects. New York: Yunona Publishing, 2019.
14. Dubey R., Gunasekaran A., Papadopoulos T., Childe S. J., Shibin K. T., and Wamba S. F. Sustainable supply chain management: framework and further research directions. *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, P. 1119–1130, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.117>
15. Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities (2018). Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. URL: https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2018/aac_1052018crp/aac_1052018crp_20_0_html/AC105_2018_CRP20E.pdf
16. Drobyazko S., and Hilorme T. Methods for evaluating technical innovations in the implementation of energy-saving measures in enterprises. *MethodsX*, 101658, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101658>