

УДК 629.58
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).9](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).9)

DEVELOPMENT OF A BATTERY POWER SOURCE FOR A CARGO SELF-PROPELLED UNDERWATER CARRIER

РОЗРОБКА АКУМУЛЯТОРНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ВАНТАЖНОГО САМОХІДНОГО ПІДВОДНОГО НОСІЯ

Andrii M. Voityasyk
andrii.voityasyk@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9409-6108

А. М. Войтасик,
канд. техн. наук, доцент

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose.* Development of a battery power source for a cargo self-propelled underwater carrier (CSUC), capable of implementing two main underwater technologies: installation of the equipment in a working position by deploying it on the sea bottom, collapsing the equipment by installing it on the CSUC and returning it to the carrier vessel (CV). *Method.* As part of the research, the method of materials science was used to select the most suitable materials for achieving the desired capacity, long service life and safety; a system approach method for integrating the battery power source into the on-board power distribution system to ensure its effective interaction with other components; the method of design optimization to improve the design of the product, in particular to achieve the optimal ratio between capacity, mass and dimensions. *Results.* An analysis of the expediency of using battery cells of various types was carried out according to the criteria of minimizing mass, overall dimensions and cost. Based on the use of lithium-ion cells, a charge/discharge control system, and the proposed structural and electrical connection scheme, a battery-powered power supply system with a constant voltage of 600 V and a capacity of 60 A·h was developed. The operation of the CSUC on-board power distribution system is ensured by the use of separate inverter-type energy converters. *Scientific novelty.* The introduction of a battery power source on board the CSUC allows the use of an optical cable-tether (CT) instead of a CT with electrical conductors, which leads to a significant reduction of the negative hydrodynamic influence of the underwater environment on the driving qualities of the underwater carrier at submersion depths of more than 100 m. The composition of on-board power consumers of the CSUC includes: an on-board computer, a video system, a navigation system, a hydroacoustic system, a propulsion-rudder complex, a ballast-leveling system, a battery power source and other equipment, including mounted equipment. *Practical importance.* A structural and electrical connection diagram of a CSUC has been developed, which provides for the division of on-board electricity consumers into groups with a nominal voltage of 12, 15, 24, 27, 48 and 600 V DC. AC/DC and DC/DC inverters are used as power converters. The use of a rechargeable power supply of a CSUC assembled on lithium-ion cells guarantees autonomy of work for 2 hours when implementing two main underwater technologies: setting the equipment in a working position by deploying it on the sea bottom, collapsing the equipment by installing it on a CSUC and return to CV.

Key words: underwater carrier; battery; equipment.

Анотація. *Мета.* Розробка акумуляторного джерела живлення вантажного самохідного підводного носія (ВСПН), що здатен реалізовувати дві основні підводні технології: установку обладнання у робоче положення шляхом розгортання його на морському дні, згортання обладнання шляхом його установки на ВСПН і повернення на судно-носії (СН). *Методика.* В рамках дослідження використано метод матеріалознавства для вибору найбільш відповідних матеріалів при досягненні бажаної ємності, тривалого терміну служби та безпеки; метод системного підходу для інтеграції акумуляторного джерела живлення в бортову систему розподілу енергоживлення, щоб забезпечити його ефективну взаємодію з іншими компонентами; метод оптимізації конструкції для покращення конструкції виробу, зокрема для досягнення оптимального співвідношення між ємністю, масою і розмірами. *Результати.* Проведено аналіз доцільності застосування акумуляторних елементів різних типів за критеріями мінімізації маси, габаритних розмірів та вартості. На базі використання літій-іонних елементів, системи контролю заряджання/розряджання та запропонованої структурної і електричної схем з'єднання, розроблено акумуляторне джерело живлення ВСПН з постійною напругою 600 В, ємністю 60 А·год. Функціонування бортової системи розподілу енергоживлення ВСПН забезпечується використанням окремих перетворюю-

вачів енергії інверторного та конверторного типу. *Наукова новизна.* Впровадження акумуляторного джерела живлення на борту ВСПН дозволяє застосувати оптичний кабель-трос (КТ) замість КТ з електричними провідниками, що призводить до суттєвого зменшення негативного гідродинамічного впливу підводного середовища на ходові якості підводного носія при глибинах занурення більше 100 м. До складу бортових споживачів енергоживлення ВСПН входять: бортовий комп'ютер, відеосистема, навігаційна система, гідроакустична система, рушійно-стерновий комплекс, баластно-вирівнююча система, акумуляторне джерело живлення та решта обладнання, в тому числі і націпне. *Практична значимість.* Розроблено структурну та електричну схеми з'єднань ВСПН, що передбачає поділ бортових споживачів електроенергії на групи номіналом 12, 15, 24, 27, 48 та 600 В постійної напруги. В якості перетворювачів електроенергії використовуються *AC/DC* інвертори та *DC/DC* конвертори. Застосування акумуляторного джерела живлення ВСПН зібраного на літій-іонних елементах гарантує автономність роботи протягом 2 год при реалізації двох основних підводних технологій: установки обладнання у робоче положення шляхом розгортання його на морському дні, згортання обладнання шляхом його установки на ВСПН і повернення на СН.

Ключові слова: підводний носій; акумулятор; обладнання.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

ВСПН реалізує дві основні підводні технології. За першою підводною технологією ВСПН вирішує завдання: доставки та установку обладнання на донну поверхню з кутом відхилення від вертикалі не більше 15°; при відхиленні вантажу від вертикалі більш ніж на 15° перестановку; по закінченні строку роботи виконання пошуку розташованого на дні обладнання, його згортання і підйом на поверхню.

Друга підводна технологія має на меті виведення обладнання із експлуатації і містить наступні режими роботи: занурення ВСПН на морське дно; пошук обладнання бортовими гідроакустичними засобами; позиціонування ВСПН над обладнанням, що залишається та перебуває на ґрунті; захват обладнання; відрив обладнання від ґрунту; спливання ВСПН із обладнанням на поверхню моря і його підхід до СН.

Тому, з метою функціонування ВСПН у зазначених режимах роботи, набуває актуальності задача розробки акумуляторного джерела живлення для забезпечення електричною енергією бортового обладнання ВСПН, яке складається з: системи інформаційного обміну ВСПН; бортового комп'ютера; рушійно-стернового комплексу; освітлювального комплексу та решти обладнання, в тому числі націпного.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Вибір саме літій-іонного типу елемента для акумуляторного джерела живлення ВСПН обумовлений його перевагами у порівнянні з іншими типами акумуляторів, такими як свинцево-кислотні, лужні, нікель-кадмієві, нікель-цинкові та срібно-цинкові [1, 2]. Основні причини, через які літій-іонний тип елементів вважається кращим: вища енергетична щільність, менша вага та розміри, довший термін служби, низький саморозряд, швидке заряджання, відсутність ефекту пам'яті, менше обслуговування [3, 4].

Звичайно, як і всі акумулятори, літєві схильні до старіння [5, 6], але в меншій мірі, ніж багато конкурентів – через 2 роки батарея зберігає понад

80% ємності. Однак як і раніше літій-іонні акумулятори вимагають дотримання техніки безпеки [7, 8], тому кожен пакет акумуляторів повинен бути обладнаний електричною схемою керування, щоб обмежити пікову напругу кожного елемента під час зарядки [9, 10], а також запобігти зниженню напруги елемента при розрядці нижче допустимого рівня для довговічної роботи батарей [11, 12]. Крім того, слід обмежити максимальний струм зарядки і розрядки та контролювати температуру елемента [13, 14].

Ці заходи призводять до подорожчання акумуляторів на основі літію, що є головною перешкодою для їх більш широкого розповсюдження [15, 16], не кажучи вже про високу вартість як самого літію, так і технології виробництва даних батарей [17, 18]. Таким чином, головний недолік літій-іонних акумуляторів – їх дорожнеча. Однак ринок літєвих елементів і батарей малої ємності, ціна яких за визначенням не може бути істотною, постійно розширюється, з'являються все нові і нові області їх використання [19, 20], так що літій-іонні акумулятори вважаються найбільш перспективними [21, 22].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Основне призначення ВСПН це транспортування з СН корисного вантажу. Для оперативного керування та отримання якісної відеоінформації з ВСПН в режимі реального часу необхідно застосовувати КТ. Передача електроенергії через КТ майже не обмежує час перебування ВСПН під водою. Проте, при застосуванні ВСПН на глибинах більше 100 м негативний вплив на їх роботу становить підводна течія.

Основна потужність рушійно-стернового комплексу (РСК) ВСПН використовується на подолання гідродинамічного опору КТ. При цьому, чим більшу потужність необхідно передати на ВСПН, тим більшим має бути діаметр КТ. Для того, щоб уникнути невиправданих втрат потужності перспективним вважаємо застосування прив'язного ВСПН з акумуляторним джерелом живленням.

В роботі запропоновано в якості енергоносія системи автономного енергоживлення застосовувати

блок літій-іонних акумуляторних батарей. Використання інверторів та конверторів напруги необхідної потужності забезпечить номінали бортового енергоживлення ВСПН на 12, 15, 24, 27, 48 та 600 В постійної напруги. Прийняті технічні рішення надають можливість використовувати КТ, який містить в своєму складі лише інформаційну складову та реалізовувати всі необхідні режими роботи ВСПН.

Метою дослідження є розробка акумуляторного джерела живлення ВСПН, що здатен реалізовувати дві основні підводні технології: установку обладнання у робоче положення шляхом розгортання його на морському дні, згортання обладнання шляхом його установки на ВСПН і повернення на СН.

ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості *об'єкта дослідження* обрано технологічні процеси, які виникають при роботі електроенергетичної системи ВСПН, до складу якої входять: бортові споживачі; акумуляторне джерело живлення; перетворювачі електроенергії.

Предметом дослідження є моделі та методи аналізу для запровадження необхідної надійності роботи акумуляторного джерела живлення ВСПН, розробка та реалізація алгоритмічного забезпечення для безпечної експлуатації виробу, забезпечення комунікації та сумісності застосованого обладнання, розробка структурної та електричної схем з'єднань ВСПН.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

До складу електрообладнання носія входять: бортовий комп'ютер; відеосистема; навігаційна система; гідроакустична система; рушійно-стерновий комплекс; баластно-вирівнююча система; акумуляторне джерело живлення.

Структурна схема акумуляторного живлення ВСПН наведена на рис. 1.

Бортовий комп'ютер виконує ключову роль в керуванні функціонуванням ВСПН, обробляючи й координуючи всі електронні сигнали та дані. Він приймає керуючі сигнали, що надходять від пульта керування, забезпечуючи їх первинну обробку. Цей процес включає в себе декодування сигналів, їх адаптацію до відповідного формату та подальшу передачу на виконавчі пристрої, що відповідають за виконання команд. Крім того, бортовий комп'ютер збирає дані, що надходять від різного обладнання, розташованого на носії. Ці дані також проходять первинну обробку, що включає їх фільтрацію, аналіз та структурування перед тим, як передати їх на пульт керування. На пульт керування ці дані надходять для проведення остаточної обробки, візуалізації на графічному інтерфейсі, а також для зберігання в базах даних для подальшого аналізу або архівування.

Відеосистема підводного носія є важливим компонентом для забезпечення ефективного функціонування та безпеки підводних операцій. До її складу

входять кілька відеокамер, які призначені для забезпечення візуального орієнтування в зоні установки обладнання. Відеокамери виконують функцію відстеження всіх процесів, що відбуваються під водою, таких як розгортання та закріплення обладнання на морському дні, а також його підйом та повернення на СН. Це дозволяє забезпечити точність виконання операцій та документувати їх у реальному часі.

Для покращення якості відео в умовах підводного середовища, відеосистема також оснащена підводними світильниками, які забезпечують необхідний рівень освітленості в зонах огляду відеокамер, що критично важливо для чіткої і зрозумілої передачі зображення. Наявність належного освітлення допомагає зменшити вплив підводної темряви і дозволяє отримувати якісні відео-записи незалежно від умов освітленості під водою.

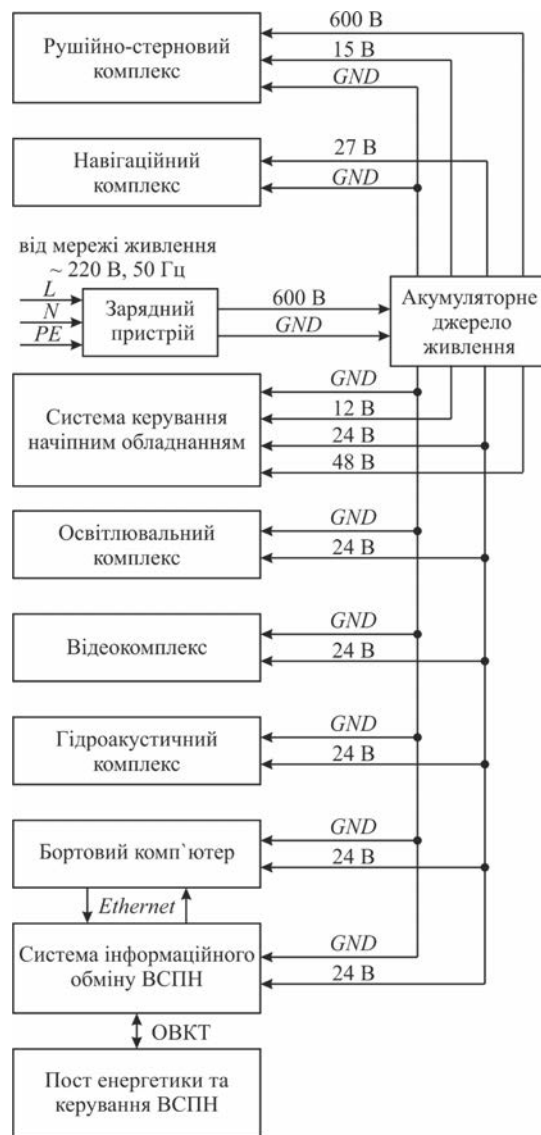


Рис. 1. Структурна схема акумуляторного живлення ВСПН

Навігаційна система є складовою частиною функціонального комплексу ВСПН, що забезпечує точність орієнтації, моніторинг переміщення та збір важливих океанографічних даних. Вона включає кілька ключових компонентів, кожен з яких відіграє важливу роль у забезпеченні ефективного та безпечного виконання підводних операцій.

Гірокомпас забезпечує точне просторове орієнтування носія у товщі води. Пристрій використовує принципи гіроскопії для визначення напрямку і підтримки стабільної орієнтації підводного носія, незалежно від коливань та змін навколишнього середовища. Це особливо важливо для підтримання стабільності під час виконання складних операцій, таких як установка обладнання на морському дні або здійснення точних вимірювань.

Датчик швидкості потрібен для визначення швидкості переміщення носія і розрахунку пройденого шляху використовується спеціалізований датчик швидкості. Виміряна швидкість, є швидкістю з якою носій рухається в підводному середовищі, що дозволяє здійснювати точні обчислення пройденої дистанції та забезпечує ефективне планування маршруту.

Океанологічна система забезпечує вимір різних океанографічних параметрів, що є критично важливими для розуміння умов навколишнього середовища. Вона включає:

- спеціалізовані датчики, які визначають точну глибину занурення носія під водою, що дозволяє уникнути потенційних перешкод і небезпек, а також контролювати глибину для досягнення оптимальних умов роботи;
- температурні сенсори, які відстежують зміни температури води, що може впливати на функціонування обладнання і вплинути на результати вимірювань;
- вимірювачі солоності, які визначають концентрацію солей у воді, що є важливим параметром для оцінки фізичних властивостей водного середовища та адаптації роботи систем носія.

Гідроакустична система складається з гідроакустичних локаторів, які використовуються для:

- пошуку обладнання на дні. Гідроакустичні локатори здатні виявляти встановлене на морському дні обладнання, що допомагає в його ідентифікації та моніторингу;
- визначення місця розташування носія. Система дозволяє точно визначити положення підводного носія відносно заданих координат або спеціальних орієнтирів, що є важливим для орієнтації та навігації в умовах підводного середовища.

Рушійно-стерновий комплекс містить: вісім гідрравлічних приводів, які створюють необхідні упори для забезпечення заданих характеристик маневрування носія. Гідрравлічні приводи виконують функцію точного регулювання положення і орієнтації носія,

що дозволяє здійснювати маневри з високою точністю і ефективністю. Вони також допомагають підтримувати стабільність носія під час виконання різноманітних операцій, таких як розгортання або згортання обладнання, та здійснюють важливу роль у управлінні напрямком руху.

Насосна станція є основою гідрравлічної системи, що забезпечує необхідний тиск для нормального функціонування всіх гідрравлічних приводів. Насосна станція також регулює витрату гідрравлічної рідини, що є важливим для здійснення маневрів носія. Вона забезпечує надходження гідрравлічної рідини з потрібними характеристиками до приводів, що дозволяє забезпечити плавність і точність маневрування як в товщі води, так і при взаємодії з донною поверхнею.

Комутаційне електро-гідрообладнання включає в себе керовані електроклапани і електродроселі, які виконують роль регуляторів роботи гідрравлічних приводів та іншого технологічного обладнання. Електроклапани забезпечують контроль за подачею гідрравлічної рідини, а електродроселі регулюють витрату і тиск, що дозволяє точно налаштовувати режими роботи приводів рушійно-стернового комплексу і технологічного обладнання, зокрема замків і захватів обладнання. Таким чином, забезпечується висока гнучкість і можливість адаптуватися до різних умов роботи підводного носія.

Баластно-вирівнююча система виконує критичні функції для підтримки стабільності та рівноваги під час виконання підводних операцій. Основне призначення цієї системи полягає в компенсації змін масового навантаження, які можуть виникати при установленні нового обладнання або його знятті з ВСПН.

Коли на підводний носій встановлюється нове обладнання або, навпаки, знімається вже встановлене, змінюється розподіл маси на носії. Баластно-вирівнююча система забезпечує автоматичне або ручне коригування маси, що допомагає підтримувати оптимальне розподіл навантаження і забезпечує стійкість носія в підводному середовищі, що дозволяє уникнути проблем з балансуванням, які можуть вплинути на його маневреність і загальну ефективність роботи. Система використовує спеціалізовані механізми для додавання або видалення води чи іншого баластного матеріалу з баластних танків підводного носія. Регулювання рівноваги допомагає зберігати оптимальне положення носія незалежно від змін у масовому навантаженні, що є особливо важливим для виконання точних операцій, таких як установка обладнання на морському дні або його підйом на поверхню.

Акумуляторне джерело живлення ВСПН забезпечує електричну енергію для всіх бортових систем та обладнання протягом виконання підводної місії. Джерело живлення включає в себе кілька важливих елементів, кожен з яких виконує свою специфічну

Перелік електричних споживчих груп ВСПН наведено в табл. 1.

Спираючись на сумарні значення струму та потужності табл. 1, обираємо однофазний *DC/AC* інвертор типу *GH15K50-600* виробництва *Schaefer*. Основні технічні характеристики інвертора представлено у вигляді табл. 2.

Відповідно до величини вихідної напруги живлення та потужності *DC/AC* інвертора, обираємо *AC/DC* конвертор типу *C5689* виробництва *Schaefer*. Основні технічні характеристики інвертора представлено у вигляді табл. 3.

Вибір *DC/DC* конвертора для живлення номіналами напруг 12, 15, 24, 27 В виконуємо враховуючи постійну напругу на вході конвертора 48 В. В рамках роботи будемо застосовувати *DC/DC* конвертори виробництва *Mean Well*. Основні технічні характеристики *DC/DC* конверторів представлено у вигляді табл. 4.

Основні параметри, які наводять виробники акумуляторних батарей це: напруга U , В; ємність C , А·год; маса m , кг; габаритні розміри: довжина l , ширина w , висота h , мм; ціна за одиницю G , грн.

Для проведення порівняльної оцінки акумуляторних батарей пропонується виділити критерії на основі базових характеристик, що надаються виробниками. За основу візьмемо базове значення енергії E_b та будемо розраховувати еквівалентну кількість акумуляторів N_b , щоб забезпечувати таку кількість енергії

$$N_b = E_b / E;$$

$$E = U \cdot C,$$

де E – енергія, що міститься в одному акумуляторі.

На основі еквівалентної кількості N_b будемо розраховувати еквівалентні масу акумуляторних батарей m_b та об'єм V_b або довжину сторони еквівалентного куба L_b , які забезпечать енергію E_b , а також еквівалентну вартість такої кількості батарей G_b

$$m_b = N_b \cdot m,$$

$$V_b = N_b \cdot l \cdot w \cdot h,$$

$$L_b = V_b^{1/3},$$

$$G_b = N_b \cdot G.$$

В програмному середовищі *Excel* було побудовано розрахункову таблицю для виведення чисельних значень еквівалентних параметрів акумуляторних елементів живлення (табл. 5).

В табл. 5 представлені значення у вигляді буквених виразів, у 2-му стовпчику представлені формули за допомогою яких були вираховані ті значення, які сприяли правильному вибору акумуляторних елементів.

В результаті проведених обчислень, величина напруги, що генерують акумуляторні елементи, представлена стандартним рядом: 6, 12 та 24 В. При цьому ємність акумуляторного джерела живлення змінюється в діапазоні від 1,3 А·год до 250 А·год, маса змінюється в діапазоні від 1,3 кг до 68 кг, ціна змінюється в діапазоні від 814,76 грн. до 381240,20 грн. Найбільш ефективним за критерієм мінімізації маси є зразок № 34 *LiFePO4* (табл. 6).

Найбільш ефективним за критерієм мінімізації габаритних розмірів є зразок № 1 *ACCU-HP1,3-1,2*. Найбільш ефективним за критерієм мінімізації ціни при врахуванні ємності є зразок № 26 *EverExceed ST-12240*. В такому разі, при розробці акумуляторного джерела живлення ВСПН обираємо за критерій вибору мінімізацію маси джерела живлення зібраного на базі літій-іонних акумуляторів.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для заряду акумуляторних батарей необхідно застосовувати інтелектуальний зарядний пристрій, який краще розмістити на СН. Серед основних переваг таких пристроїв можна відзначити: виконання самостійного процесу заряду акумуляторних батарей; по завершенню процесу заряду автоматичне відключення від бортової мережі СН; захист від перевантаження, короткого замикання, перегріву.

Таблиця 1. Електричні споживчі групи ВСПН

№ п/п	Електрична споживча група	Напруга живлення, В	Споживчий струм, А	Повна потужність, Вт
1	Рушійно-стерновий комплекс	600	25	15000
2	СК навіпним обладнанням	48	10	480
3	Навігаційний комплекс	27	0,78	21
4	СК навіпним обладнанням	24	10	240
	Освітлювальний комплекс		8x1,6	8x38,4
	Гідроакустичний комплекс		0,63	15
	Відеокомплекс		3x2	3x12
	Бортовий комп'ютер		1,67	40
	Система ІО		0,83	20
	Рушійно-стерновий комплекс	15	5	75
5	СК навіпним обладнанням	12	10	120
Сумарні значення струму та потужності електричних груп напругою 12–48 В			57,71	1354,2

Таблиця 2. Основні технічні характеристики інвертора *GH15K50-600*

Напруга на вході, В (DC)	Напруга на виході, В (AC)	Частота живлення, Гц	Потужність, кВт	Коефіцієнт корисної дії (ККД), %	Габаритні розміри, мм
340–640	230	50	15	90	482,6x360x131,1

Процес зарядки літій-іонних акумуляторних елементів має ряд особливостей. Під час заряду, коли напруга на елементі збільшується до 4,2 В, необхідно виконувати відключення подачі напруги на елемент живлення. Допустиме значення напруги може відхилитися лише на 0,05 В. Середній літій-іонний акумулятор заряджається приблизно 3 год. Проте точний час заряджання залежить саме від ємності акумулятора.

Якщо ємність акумулятора C заряджається за час t , то швидкість заряду визначається відношенням C/t . Акумулятор ємністю 100 А·год при розряді зі швидкістю $C/5$ цілком розрядиться за 5 годин, при цьому струм розряду складе 100/5, або 20 А. Швидкість заряду можна оцінити в тривалостях циклу. Ні в якому разі не можна допускати перезаряд та повне розряджання такого акумулятора.

Розрахунок часу автономної роботи ВСПН виконуємо за формулою

$$T = \frac{C \cdot U \cdot \eta_{e.c.}}{P_{e.c.}},$$

де C – ємність збірки акумуляторного джерела живлення, А·год;

U – сумарний струм системи, В;

η – ККД перетворювача енергії;

$P_{e.c.}$ – загальна потужність бортової системи ВСПН, Вт.

В такому, разі час автономної роботи джерела живлення становитиме

$$T = \frac{60 \cdot 600 \cdot 0,9}{16354} \cdot 60 = 118,8 \text{ хв} \approx 2 \text{ год.}$$

Така автономність джерела живлення повністю задовольняє умовам застосування ВСПН.

Таблиця 3. Основні технічні характеристики конвертора C5689

Напруга на вході, В (AC)	Напруга на виході, В (DC)	Номинальний струм, А	Потужність, кВт	ККД, %	Габаритні розміри, мм
230	48	80	4500	80	602x360x174,8

Таблиця 4. Основні технічні характеристики 48 В конверторів

№ з/п	Назва параметра	Значення			
		SD-150C-12	SD-25C-12	SD-1000L-24	SD-25C-24
1	Напруга на вході, В	36–72	36–72	19–72	36–72
2	Напруга на виході, В	12	12	24	24
3	Максимальний струм на виході, А	12,5	2,1	40	1,1
4	ККД, %	77%	78	88	81
5	Повна потужність, Вт	150	25	100	25
6	Опір ізоляції, МОм	100	100	100	100
7	Діапазон робочих температур, С°	-10 – +60	-10 – +60	-20 – +60	-10 – +60
8	Габаритні розміри, мм	199x110x50	98x97x36	295x127x41	99x97x36
9	Маса, кг	0,86	0,38	1,94	0,38

Таблиця 5. Таблиця чисельних значень еквівалентних параметрів

№ п/п	Назва	U, В	c, А*час	E, Вт*час	m, кг	ДхШхВ, мм			V, м*3	G, грн	E _b , Вт*час	N _b , шт	m _b , кг	V _b , м*3	L _b , м	G _b , грн
1	А	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	І	Г	К	Л	М	Н	О	Р
2	Ввести значення	Ввести значення	Ввести значення	=C*B	Ввести значення	Ввести значення	Ввести значення	Ввести значення	=(F*G*N)*10 ⁻³	Ввести значення	Const 5000	=K/D	=L/E	=M/I		=G*L

Таблиця 6. Еквівалентні характеристики акумуляторних елементів

№ п/п	Назва	N _b , шт	m _b , кг	V _b , м*3	L _b , м	G _b , грн
№ 1	ACCU-HP1,3-1,2	320,5	198,1	0,046554	0,360	265229,16
.....						
№ 26	EverExceed ST-12240	1,9	122,0	3,321637	1,501	63801,16
.....						
№ 34	LiFePO4	3,5	62,5	1,816425	1,220	292960,42

ВИСНОВКИ

1. Розроблено структурну та електричну схеми з'єднань ВСПН, що передбачає поділ бортових споживачів електроенергії на групи номіналом 12, 15, 24, 27, 48 та 600 В постійної напруги. В якості перетворювачів електроенергії використовуються *AC/DC* інвертори та *DC/DC* конвертори.

2. Застосування акумуляторного джерела живлення ВСПН зібраного на літій-іонних елементах гарантує автономність роботи протягом 2 год при реалізації двох основних підводних технологій: установки обладнання у робоче положення шляхом розгортання його на морському дні, згортання обладнання шляхом його установки на ВСПН і повернення на СН.

REFERENCES

- [1] Mohsen, H., Mohammad, G. T., Anam, T., Eero, I., Hashem, H., & Juha, P. (2024). Analysis of ECM battery modeling techniques for different battery types. *13th International workshop on robot motion and control*. DOI: 10.1109/RoMoCo60539.2024.10604356
- [2] Ergashali, Y.R., Diyorbek, K., Shuxrat, S., Fozilbek, J., Abdumannop, I., & Bahrom, O. (2024). Battery technologies: exploring different types of batteries for energy storage. *Climate variability monitoring and sustainable development*. DOI: 10.1051/bioconf/20248405034
- [3] Moses, J., Barasa, K., & Oludolapo, O. (2024). Types of grid scale energy storage batteries. *Advances in clean energy systems and technologies*. DOI: 10.1007/978-3-031-49787-2_18
- [4] Qizheng, C. (2024) Types of batteries for new energy electric vehicles. *Science and technology of engineering chemistry and environmental protection*. DOI: 10.61173/1e54eb37
- [5] Yun, Z., Zhirong, W., Jialong, L., & Zhongsheng, X. (2024). Influence of positive temperature coefficient and battery aging on external short circuit for 18650-type battery. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. DOI: 10.1007/s10973-024-13099-3
- [6] Sami, M.Ö., & Ahmet, Ç. (2023). A study in enhancing battery management systems for diverse battery types. *International scientific and vocational journal*, 7(2), 122-136 DOI: 10.47897/bilmes.1385510
- [7] Jianlin, L., Yuchen, P., Qian, W., & Haitao, L. (2024). Status and prospects of research on lithium-ion battery parameter identification. *Batteries*, 10(6), 194. DOI: 10.1007/s40831-024-00859-6
- [8] Ali, H., Khan, H.A., & Pecht, M.G. (2021). Circular economy of li batteries: technologies and trends. *Energy storage*, 40:102690. DOI: 10.1016/J.EST.2021.102690
- [9] Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75-86. DOI: 10.1038/S41586-019-1682-5
- [10] Tan, J., Wang, Q., Chen, S., Li, Z., Sun, J., Liu, W., Yang, W., Xiang, X., Sun, X., & Duan, X. (2021). Recycling-oriented cathode materials design for lithium-ion batteries: elegant structures versus complicated compositions. *Energy storage mater*, 41, 380-394. DOI: 10.1016/J.ENS.2021.06.021
- [11] Miao, Y., Liu, L., Zhang, Y., Tan, Q., & Li, J. (2022). An overview of global power lithium-ion batteries and associated critical metal recycling. *Hazard mater*, 425, 127900. DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.127900
- [12] Cui, Y.S., Sun, Y., Lin, X., Zheng, J., Wang, M., Wang, Y., Lin, X., Jiang, X., Zheng, Z., Zheng, S., & Yu, G. (2021). Characterization on thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicles: a review. *Energy storage*, 41, 102888. DOI: 10.1016/J.EST.2021.102888
- [13] Liu, C., Lin, J., Cao, H., Zhang, Y., & Sun, Z. (2019). Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: a critical review. *Clean prod*, 228, 801-813. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.304
- [14] Liu, L., Li, M., Chu, L., Jiang, B., Lin, R., Zhu, X., & Cao, G. (2020). Layered ternary metal oxides: performance degradation mechanisms as cathodes, and design strategies for high-performance batteries. *Prog mater sci*, 111, 100655. DOI: 10.1016/J.PMATSCI.2020.100655
- [15] Golmohammadzadeh, R., Faraji, F., & Rashchi, F. (2018). Recovery of lithium and cobalt from spent lithium ion batteries (LIBs) using organic acids as leaching reagents: a review. *Resour conserv recycl*, 136, 418-435. DOI: 10.1016/J.RESCONREC.2018.04.024
- [16] Zheng, X., Zhu, Z., Lin, X., Zhang, Y., He, Y., Cao, H., & Sun, Z. (2018). A mini-review on metal recycling from spent lithium ion batteries. *Engineering*, 4(3), 361-370. DOI: 10.1016/J.ENG.2018.05.018
- [17] Jung, J.C., Sui, P.C., & Zhang J. (2021). A review of recycling spent lithium-ion battery cathode materials using hydrometallurgical treatments. *Energy storage*, 35, 102217. DOI: 10.1016/J.EST.2020.102217
- [18] Tokoro, C., Lim, S., Teruya, K., Kondo, M., Mochidzuki, K., Namihira, T., & Kikuchi, Y. (2021). Separation of cathode particles and aluminum current foil in Lithium-Ion battery by high-voltage pulsed discharge: experimental investigation. *Waste manage*, 125, 58-66. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.01.008
- [19] Yujuan, S., Hao, Tian Fangfang, H., & Jiuyu, D. (2024). Method for evaluating degradation of battery capacity based on partial charging segments for multi-type batteries. *Batteries*, 10(6), 187. DOI: 10.3390/batteries10060187
- [20] Chan, K.H., Malik, M., & Azimi, G. (2022). Separation of lithium, nickel, manganese, and cobalt from waste lithium-ion batteries using electrodialysis. *Resour conserv recycl*, 178, 106076. DOI: 10.1016/J.RESCONREC.2021.106076
- [21] Gregor, G., Markus, K., Katja Froehlich, Alexander Bergmann, & Alexander Bergmann (2024). State estimation of a lithium-ion battery pack by using Lamb waves generated from piezoelectric transducers. *ECS meeting abstracts*, 1(51), 2763-2763. DOI: 10.1149/MA2024-01512763mtgabs
- [22] Guanru, L., Yongping, C., Chengbin, Z., Yangfan, Z., & Chujin, B. (2024). Modelling and temperature control of liquid cooling process for lithium-ion battery. *Journal of thermal science*, 33(5), 1-15. DOI: 10.1007/s11630-024-2013-1

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Mohsen, H., Mohammad, G. T., Anam, T., Eero, I., Hashem, H., Juha, P. (2024). Analysis of ECM battery modeling techniques for different battery types. *13th International workshop on robot motion and control*. DOI: 10.1109/RoMoCo60539.2024.10604356
- [2] Ergashali, Y.R., Diyorbek, K., Shuxrat, S., Fozilbek, J., Abdumannop, I., Bahrom, O. (2024). Battery technologies: exploring different types of batteries for energy storage. *Climate variability monitoring and sustainable development*. DOI: 10.1051/bioconf/20248405034
- [3] Moses, J., Barasa, K., Oludolapo, O. (2024). Types of grid scale energy storage batteries. *Advances in clean energy systems and technologies*. DOI: 10.1007/978-3-031-49787-2_18
- [4] Qizheng, C. (2024). Types of batteries for new energy electric vehicles. *Science and technology of engineering chemistry and environmental protection*. DOI: 10.61173/1e54eb37
- [5] Yun, Z., Zhirong, W., Jialong, L., Zhongsheng, X. (2024). Influence of positive temperature coefficient and battery aging on external short circuit for 18650-type battery. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. DOI: 10.1007/s10973-024-13099-3
- [6] Sami, M.Ö., Ahmet, Ç. (2023). A study in enhancing battery management systems for diverse battery types. *International scientific and vocational journal*, 7(2), 122-136 DOI: 10.47897/bilmes.1385510
- [7] Jianlin, L., Yuchen, P., Qian, W., Haitao, L. (2024). Status and prospects of research on lithium-ion battery parameter identification. *Batteries*, 10(6), 194. DOI: 10.1007/s40831-024-00859-6
- [8] Ali, H., Khan, H.A., Pecht, M.G. (2021). Circular economy of li batteries: technologies and trends. *Energy storage*, 40:102690. DOI: 10.1016/J.EST.2021.102690
- [9] Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75-86. DOI: 10.1038/S41586-019-1682-5
- [10] Tan, J., Wang, Q., Chen, S., Li, Z., Sun, J., Liu, W., Yang, W., Xiang, X., Sun, X., Duan, X. (2021). Recycling-oriented cathode materials design for lithium-ion batteries: elegant structures versus complicated compositions. *Energy storage mater*, 41, 380-394. DOI: 10.1016/J.ENS.2021.06.021
- [11] Miao, Y., Liu, L., Zhang, Y., Tan, Q., Li, J. (2022). An overview of global power lithium-ion batteries and associated critical metal recycling. *Hazard mater*, 425, 127900. DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.127900
- [12] Duh, Y.S., Sun, Y., Lin, X., Zheng, J., Wang, M., Wang, Y., Lin, X., Jiang, X., Zheng, Z., Zheng, S., Yu, G. (2021). Characterization on thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicles: a review. *Energy storage*, 41, 102888. DOI: 10.1016/J.EST.2021.102888
- [13] Liu, C., Lin, J., Cao, H., Zhang, Y., Sun, Z. (2019). Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: a critical review. *Clean prod*, 228, 801-813. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.304
- [14] Liu, L., Li, M., Chu, L., Jiang, B., Lin, R., Zhu, X., Cao, G. (2020). Layered ternary metal oxides: performance degradation mechanisms as cathodes, and design strategies for high-performance batteries. *Prog mater sci*, 111, 100655. DOI: 10.1016/J.PMATSCI.2020.100655
- [15] Golmohammadzadeh, R., Faraji, F., Rashchi, F. (2018). Recovery of lithium and cobalt from spent lithium ion batteries (LIBs) using organic acids as leaching reagents: a review. *Resour conserv recycl*, 136, 418-435. DOI: 10.1016/J.RESCONREC.2018.04.024
- [16] Zheng, X., Zhu, Z., Lin, X., Zhang, Y., He, Y., Cao, H., Sun, Z. (2018). A mini-review on metal recycling from spent lithium ion batteries. *Engineering*, 4(3), 361-370. DOI: 10.1016/J.ENG.2018.05.018
- [17] Jung, J.C., Sui, P.C., Zhang, J. (2021). A review of recycling spent lithium-ion battery cathode materials using hydrometallurgical treatments. *Energy storage*, 35, 102217. DOI: 10.1016/J.EST.2020.102217
- [18] Tokoro, C., Lim, S., Teruya, K., Kondo, M., Mochidzuki, K., Namihira, T., Kikuchi, Y. (2021). Separation of cathode particles and aluminum current foil in Lithium-Ion battery by high-voltage pulsed discharge: experimental investigation. *Waste manage*, 125, 58-66. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.01.008
- [19] Yujuan, S., Hao, Tian Fangfang, H., Jiuyu, D. (2024). Method for evaluating degradation of battery capacity based on partial charging segments for multi-type batteries. *Batteries*, 10(6), 187. DOI: 10.3390/batteries10060187
- [20] Chan, K.H., Malik, M., Azimi, G. (2022). Separation of lithium, nickel, manganese, and cobalt from waste lithium-ion batteries using electrodialysis. *Resour conserv recycl*, 178, 106076. DOI: 10.1016/J.RESCONREC.2021.106076
- [21] Gregor, G., Markus, K., Katja Froehlich, Alexander Bergmann, Alexander Bergmann (2024). State estimation of a lithium-ion battery pack by using Lamb waves generated from piezoelectric transducers. *ECS meeting abstracts*, 1(51), 2763-2763. DOI: 10.1149/MA2024-01512763mtgabs
- [22] Guanru, L., Yongping, C., Chengbin, Z., Yangfan, Z., Chujin, B. (2024). Modelling and temperature control of liquid cooling process for lithium-ion battery. *Journal of thermal science*, 33(5), 1-15. DOI: 10.1007/s11630-024-2013-1

© Войтасик А. М.

Дата надходження статті до редакції: 25.10.2024

Дата затвердження статті до друку: 07.11.2024