

Ю.В. Ващенко¹, М.М. Вознюк¹, Т.В. Бабкіна¹, Р.М. Могилевський²

¹Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

²Національний університет оборони України, Київ

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ЗАМІНИ ЛУЖНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ НА ЛІТІЙ-ТІТАНАТНІ В ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ БОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ ДЕРЖАВНИХ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

У статті розглянуто актуальне науково-технічне завдання заміни лужних авіаційних акумуляторних батарей на сучасні літій-тітанатні акумулятори в резервних і аварійних джерелах електроживлення повітряних суден державної авіації. Проаналізовано переваги і недоліки використання нікель-кадмієвих акумуляторних батарей у складі літальних апаратів військового призначення. Проведено порівняння характеристик лужних і літій-тітанатних акумуляторних батарей. На основі математичного апарату багатокритерійної оптимізації у комплексі з основними принципами системних досліджень визначено порядок вибору варіанта аварійного джерела електроживлення повітряних суден державної авіації.

Ключові слова: експлуатація, авіаційна техніка, повітряне судно, державна авіація, безпека польотів, рівень справності, джерело живлення, авіаційна акумуляторна батарея.

Вступ

На сьогодні в умовах ведення бойових дій застосування авіаційної складової сил оборони напряму залежить від забезпечення належного рівня справності повітряних суден (ПС) державної авіації (ДА) України. Важливу роль в цьому процесі відіграють резервні і аварійні джерела живлення (ДЖ), а саме бортові авіаційні акумуляторні батареї (АБ), що забезпечують постійним струмом приймачі 1-ої категорії при відмовах основної системи електропостачання, забезпечення технічного обслуговування ПС, запуск авіаційних двигунів за відсутності стаціонарних і пересувних агрегатів електроживлення, живлення аварійних радіостанцій та аварійних радіомаяків. Технічний стан АБ, їх характеристики повинні забезпечувати вимоги до сучасної авіаційної техніки (АТ) і відповідати таким критеріям:

- простота експлуатації;
- значний ресурс;
- мінімальний час підготовки до використання;
- робота в широкому діапазоні температур;
- здатність витримувати великі пускові струми;
- низький саморозряд батареї;
- працювати в пристроях з великими струмами розряду і заряду;
- мінімальні масо-габаритні показники;
- проста технологія утилізації;
- мінімальна вартість життєвого циклу.

Тому **актуальним науково-технічним завданням** є впровадження в експлуатацію сучасних зразків АБ, які відповідають цим критеріям.

При цьому важливо щоб нові зразки АБ мали логістичний ланцюг від виробника до експлуатанта, прості та зрозумілі форми технічного обслуговування й алгоритм експлуатації і ремонту.

Аналіз попередніх досліджень. Вирішення питання підвищення рівня справності ПС ДА України присвячено багато наукових праць.

У [1, с. 152...156] приведено проблеми застосування лужних АБ і надано пропозиції щодо експлуатації авіаційних лужних АБ за технічним станом.

У [2, с. 29...32] розглянуто задачі вибору доцільного варіанту резервного і аварійного джерела живлення для ПС ДА України, що полягає у визначенні найкращих характеристик серед існуючих типів авіаційних АБ.

Однак у даних дослідженнях не враховано стрімкий розвиток промисловості і появу зразків АБ, які розроблені на основі сучасних технологічних рішень, мають інший принцип дії, кращі технічні характеристики, збільшений ресурс, кращі масо-габаритні характеристики.

Тому **мета статті** полягає у зміні підходів до вибору нових типів АБ, які забезпечать підтримання належного рівня справності ПС ДА.

Виклад основного матеріалу

На сьогодні найпоширенішим типом АБ, які експлуатуються в авіаційних підрозділах ДА є

лужні нікель-кадмієві (НК) АБ. Розпорядчими документами відповідних посадових осіб до експлуатації допущено лужні НК АБ таких типів: 20НKBH-25; 20RSX-22; 20FP25Y1C-R; F20/27; NCSP B 25150.

Перевагами НК АБ є:

- можливість швидкого і простого заряду, навіть після тривалого зберігання акумулятора;
- велика кількість циклів заряд/розряд (при правильній експлуатації – більше 1000 циклів;
- тривалі терміни зберігання;
- під час зберігання не потребує обслуговування, може зберігатися в розрядженому стані;
- експлуатація при низьких температурах;
- низька вартість.

Основними недоліками НК АБ є притаманні для даного типу акумуляторів явища ефекту пам'яті, теплового розгону акумулятора та використання токсичних матеріалів, що вимагає від експлуатантів ретельного дотримання інструкцій з експлуатації АБ, підтримання чистоти приміщень зарядних акумуляторних станцій, обов'язкової утилізації АБ після закінчення експлуатації.

В країнах Європи використання НК АБ обмежено директивою RoHS [3] через вміст токсичних речовин і застосовуються лише там, де замінити їх не вдається, а саме в пристроях з великим розрядним і зарядним струмом. В Україні НК АБ не виготовляють.

Враховуючи це назріває нагальне питання заміни НК АБ на сучасні АБ, які мають рівні або переважають їх за технічними характеристиками і відповідають вимогам щодо безпечності використання.

Завдання вибору варіанта джерела живлення полягає у оцінюванні його характеристик та ефективності використання при виконанні заданих (априорно відомих) умов і обмежень.

Показники, від яких залежать якості ДЖ, кількісно описують деякими змінними дискретними величинами $x_1, x_2, \dots, x_n$, заданих у області визначення X , – аргументи оптимізації. У свою чергу, кожен з властивостей ДЖ кількісно можна описати за допомогою змінної y , значення якої і характеризує ДЖ відносно показників якості [2, с. 29...32; 4].

У загальному випадку показники $y_1, y_2, \dots, y_s$ – це критерії якостей, які формують вектор $y = \{y_k\}_{k=1}^s$ визначений у допустимій області M . Його компоненти кількісно відображають якості

ДЖ при заданій сукупності аргументів оптимізації $x = \{x_i\}_{i=1}^n \in X$.

Функція $y = f(x)$ зв'язує критерії якості з аргументами оптимізації (у векторних задачах за таку функцію як правило використовують скалярну згортку $Y = Y[y(x)]$ часткових критеріїв). В задачі, що розглядається, функція $f(x)$ є функція, що оцінює.

Отже, задачу дослідження формулюємо, як знаходження таких характеристик (сполучення аргументів з області визначення) джерел живлення, при яких функція оцінювання прийме екстремальне значення (найкращий результат вибору)

$$x^* = \arg \operatorname{extr}_{x \in X} Y[y(x)].$$

Тобто завдання дослідження полягає у виборі такого раціонального варіанта аварійного ДЖ ПС ДА, який забезпечить кращі характеристики (у порівнянні з існуючими ДЖ) відносно априорно відомої системи переваг Замовника.

Фахівцями Державного науково-дослідного інституту авіації (ДНДІА) розроблено методику вибору раціонального варіанта забезпечення справності резервних і аварійних ДЖ, яка базується на застосуванні математичного апарату багатокритерійної оптимізації у комплексі з основними принципами системних досліджень. Методологічні основи для цього вже існують, а саме: розроблено загальну схему формалізації та специфічні методи розв'язання задач багатокритерійного вибору [2, с. 29...32; 5, с.352].

Сутність таких підходів полягає у розгляді альтернатив відносно вектору часткових критеріїв. Завдання полягає в одночасній мінімізації (або максимізації) всіх n критеріїв

$$\Omega_X^* : \bar{J}(x^*) = \operatorname{extr} \bar{J}(x), \quad x \in \Omega_X.$$

Даний підхід дозволяє реалізувати вибір при одночасному обліку багатьох цільових установок як для випадку значної множини варіантів для вибору, так і для випадку конкурентних (альтернатив) аварійних ДЖ.

Результуюча множина рішень Ω_X^* може мати більше одного елемента у загальному випадку. Крім того, локальні екстремуми за окремими частковими критеріями можуть не бути рішенням головної багатокритерійної задачі, що значно ускладнює процедуру вибору. Вихід з ситуації, що склалась, – зведення даної багатокритерійної задачі до відомих задач вибору відносно одного критерію.

При виборі у якості критеріїв запропоновано використовувати: електричні характеристики джерела живлення (напруга U ; максимальний струм I_m ; ємність Q ; кількість запусків n); масово-габаритні характеристики (габаритні розміри: довжина l ; ширина d ; висота h ; маса m); характеристики надійності (встановлений строк служби $T_{сл}$; ресурс (циклів) N ; коефіцієнт $K_{ТВ}$ технічного використання); вартість (питома вартість закупівлі C_0 ; питома вартість технічного обслуговування C_{TO}).

При відборі для розгляду можливих варіантів застосування тих чи інших АБ використано методику перевірки достатності ємності АБ для живлення приймачів електроенергії 1-ої категорії, а також враховано обмеження щодо масово-габаритних характеристик.

Перспективним варіантом заміни НК АБ можуть слугувати літєві та літій-тітанатні (ЛТ) АБ.

На сьогодні застосування літєвих ДЖ вже проводять вітчизняні підприємства промисловості. Так товариство з обмеженою відповідальністю “Промсіел” налагодило виробництво автономного аеродромного агрегату АПДЖ-45/1800-1 у складі якого використовуються шість літєвих акумуляторів ємністю 40 А/год і напругою 100 В кожний [6].

А товариство з обмеженою відповідальністю “Миколаївський авіаремонтний завод”, відповідно до рішення Міністерства оборони України “Про організацію робіт з відновлення та взяття на облік конструкторської документації для виготовлення джерела автономного живлення аварійної короткохвильової радіостанції Р-861 літаків типу Іл-76МД”, проводить заміну штатних акумуляторів КНПЗ-7, виробництво яких припинено, на сучасні ДЖ, основу яких складають літєві елементи типу SAFT LSH-20 [2, с. 29...32].

Але для заміни НК АБ як аварійного ДЖ ЛА ДА розглянемо ЛТ АБ.

Перевагою технології ЛТ АБ є те, що анод, виготовлений з тітаната літію і має розвинуту нанокристалічну структуру. Така структура забезпечує найбільш ефективну площу поверхні електрода в порівнянні з пористим вуглецевим, який використовують в НК АБ та інших типах літєвих батарей, що позитивно відображається на допустимих струмах, поліпшує довговічність і безпечність батареї. Даний тип батареї має низький саморозряд, приблизно 0,02 % за добу. Тип анода ЛТ АБ дозволяє збільшити життєвий цикл батареї до 20000 і більше циклів заряд-розряд, що в рази більше від інших типів акумуляторних батарей.

Крім великого ресурсу, ці акумулятори також мають дуже малий внутрішній опір, що дозволяє їм працювати зі струмами до 15С (де С – коефіцієнт, що використовується для масштабування струму заряду та розряду АБ), а деякі моделі працюють зі струмами до 300С. Це дозволяє за належного охолодження зарядити акумулятор до 80 % ємності за 6...8 хвилин.

Графіки швидкості заряду та втрати ємності ЛТ АБ від кількості циклів заряду-розряду приведено на рис. 1 і рис. 2 відповідно.

Також перевагою є спектр робочих температур (від -30°C до $+50^{\circ}\text{C}$), при яких, на відміну від акумуляторів інших типів, ЛТ акумулятори здатні працювати без значної втрати ємності.

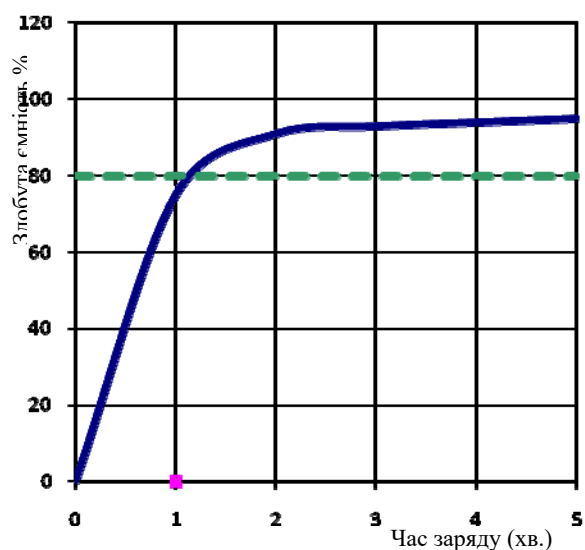


Рис. 1. Графік швидкості заряду ЛТ АБ
Джерело: [7]

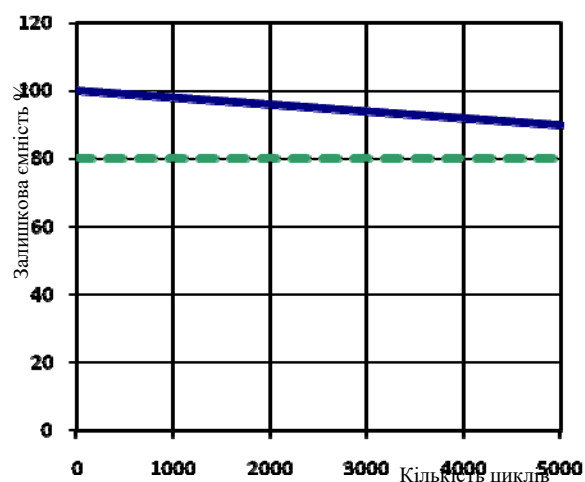


Рис. 2. Графік втрати ємності ЛТ АБ від кількості циклів заряду-розряду
Джерело: [7]

Порівняльні характеристики НК і ЛТ АБ приведено в таблиці.

Таблиця

Технічні характеристики розглянутих типів АБ

№ з/п	Найменування характеристики	Акумулятор	
		Нікель-кадмій	Літій-тітанат
1.	Номінальна напруга одного елементу	1,2 В	2,4 В
2.	Максимальна напруга одного елементу	1,35 В	2,7 В
3.	Мінімальна напруга одного елементу	1 В	1,6 В
4.	Питома густина енергії*	45...65 Втгод/кг	190...250 Втгод/кг
5.	Саморозряд	8...10 % заряду кожного місяця	10...20 % протягом року
6.	Кількість робочих циклів до втрати 20 % ємності*	100...2500	2000...7000
7.	Робочі температури	-30°C...+50°C	-30°C...+55°C
8.	Шкідливі речовини	Кадмій	Відсутні

* залежно від конструкції і якості використаних матеріалів

Джерело: [7, 8]

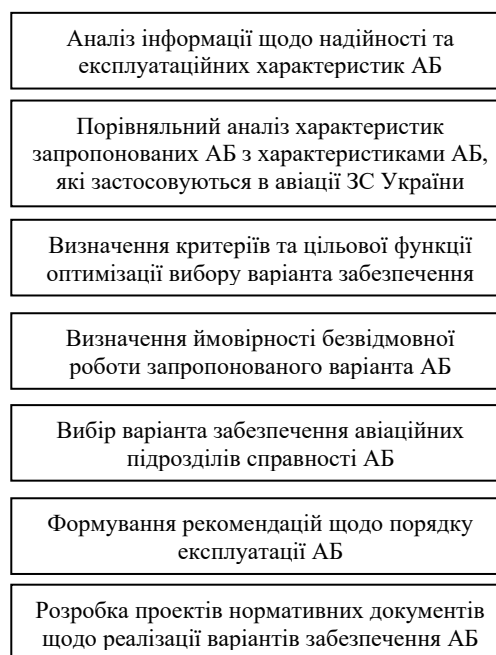
Отже, характеристики ЛТ АБ є кращі за характеристики НК АБ, що дозволяє розглядати їх використання в якості резервних і аварійних джерел живлення ЛА ДА України.

Тому задачу вибору прийнятного варіанта ДЖ на заміну лужних АБ вирішено з урахуванням методологічних основ розв'язання задач багатокритерійного вибору.

Відповідний порядок вибору варіанта ДЖ на заміну лужних АБ наведено на рис. 3.

Висновки

Запропонований підхід щодо заміни лужних АБ на ЛТ АБ, дозволить забезпечити якісну і своєчасну підготовку АТ і як наслідок належний рівень справності ПС ДА та їх готовність до виконання завдань за призначенням. Тому **напрямом подальших досліджень** має бути організація та проведення дослідної експлуатації ЛТ АБ в авіаційних підрозділах ДА, навчання особового складу зарядних акумуляторних станцій їх обслуговуванню, виявлення й усунення недоліків та внесення змін в експлуатаційну документацію типу ЛА на якому планується застосування даних АБ.

Рис. 3. Порядок вибору варіанта джерела живлення
Джерело [2, с. 29...32]

Список літератури

1. Агамов Л.Г., Вознюк М.М., Лещенко Ю.М. Пропозиції щодо експлуатації авіаційних нікель-кадмієвих акумуляторних батарей за технічним станом. Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2009. Вип. 5 (12). – С 152-156.
2. Агамов Л.Г., Єрко В.Б., Вознюк М.М., Бабкіна Т.В. Щодо забезпечення справності резервних і аварійних джерел живлення бортового обладнання суден Державної авіації. Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2020. Вип. 16 (23). – С 29-32.
3. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council. URL. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.icqc.eu/ru/certifikacija-ce/rohs/rohsiii>.
4. Kononov O. A., Yerko V.B., Shatrov A.M., Shishakov M.O. Analysis of the Scientific and Methodological Apparatus for Selecting the Option of Onboard Equipment for Military Aircraft. [Електронний ресурс] //2023 <https://10.51582/interconf.19-20.03.2023.067>.
5. Воронин А.Н., Зиятдинов Ю.К., Куклинский М.В. Многокритериальные решения: модели и методы: монография – К.: НАУ, 2011. – 352 с.
6. Promsiel. Офіційний сайт. URL. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.promsiel.com>.
7. Toshiba. URL. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/about>.

8. Experimental Investigation of the Thermal and Cycling Behavior of a Lithium Titanate-based Lithium-ion Pouch Cell. – URL. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.doi.org/10.1016/j.est.2018.02.012>.

Надійшла до редколегії 05.11.2024

Схвалена до друку 20.11.2024

Відомості про авторів:

Ващенко Юрій Володимирович

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<http://orcid.org/0009-0002-0261-0606>

Вознюк Микола Миколайович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
заступник начальника науково-дослідного відділу
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9730-1376>

Бабкина Тетяна Василівна

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2611-3631>

Могилевський Рустам Миколайович

магістр
начальник управління персоналу – заступник начальника
штабу Національного університету оборони України,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0006-8835-1535>

Information about authors:

Yurii Vashchenko

Research Associate
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0002-0002-0261-0606>

Mykola Voznyuk

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Deputy Head of Research Department
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9730-1376>

Tetiana Babkina

Research Associate
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2611-3631>

Rustam Mogylevskyi

Master
Head G-1 – Deputy Chief of Staff
of National Defence University of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-8835-1535>

**ABOUT THE POSSIBILITY OF ALKALINE BATTERIES WITH LITHIUM-TITANATE
BATTERIES IN RESERV AND EMERGENCY POWER SOURCES OF ON-BOARD EQUIPMENT OF
STATE AVIATION AIRCRAFT**

Y. Vashchenko, M. Voznyuk, T. Babkina, R. Mogylevskyi

The article considers the current scientific and technical task of replacing alkaline aviation batteries with modern lithium-titanate batteries in backup and emergency power sources of state aviation aircraft. The advantages and disadvantages of using nickel-cadmium batteries in military aircraft are analyzed. The characteristics of alkaline and lithium-titanate batteries are compared. Based on the mathematical apparatus of multi-criteria optimization in combination with the basic principles of systems research, the procedure for selecting an emergency power source for aircraft of state aviation is determined.

The purpose of the article is to change approaches to the selection of new types of batteries that will provide an advantage over existing ones and ensure the maintenance of the proper level of serviceability of state aviation aircraft.

The proposed methodical approach to replacing alkaline batteries with lithium-titanate batteries will ensure high-quality and timely training of aviation equipment and, as a result, the appropriate level of serviceability of state aviation aircraft and their readiness to perform assigned tasks.

The task of choosing an acceptable option of power sources for replacing alkaline storage batteries is solved taking into account the methodological foundations of solving multi-criteria selection problems.

Keywords: operation, aviation equipment, aircraft, state aviation, flight safety, serviceability level, power source, aviation battery.