

УДК 621.311.012

А.І. Ругаль

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕМОНТУ АВІАЦІЙНИХ НІКЕЛЬ-КАДМІЄВИХ БАТАРЕЙ

*Пропонується методика ремонту авіаційних нікель-кадмієвих батарей, що орієнтована на використання в умовах експлуатуючих організацій. Несправні батареї передбачається перекомплектувати за розрядними характеристиками акумуляторів, які є у наявності. Розроблено новий критерій припустимої комплектації, який дозволяє використовувати акумулятори з ємністю, меншою за мінімально припустиму ємність батареї. Варіанти комплектації пропонується обирати в залежності від таких задач експлуатанта, які вважаються ним першочерговими. Розроблено критерії комплектації для вирішення таких задач: комплектація однієї батареї з мінімальною розбіжністю ємності акумуляторів; комплектація однієї батареї з максимальною ємністю; комплектація бортового комплекту батарей з мінімальною розбіжністю ємності між батареями; комплектація максимальної кількості батарей. Методика дозволяє гарантовано отримувати батареї розрахункової ємності.*

**Ключові слова:** авіаційні акумуляторні батареї, ремонт, комплектація, методика.

### Постановка проблеми

Нікель-кадмієві акумулятори знаходять широке використання у промисловій сфері і на транспорті, в тому числі повітряному, що пояснюється великим досвідом технології їх виробництва та високими експлуатаційними характеристиками. Однією з найважливіших експлуатаційних характеристик авіаційних нікель-кадмієвих акумуляторів є їх ресурс. Ресурс нікель-кадмієвих акумуляторів за довідковими даними складає до 1000 циклів. З іншого боку, досвід експлуатації свідчить, що ресурс авіаційних нікель-кадмієвих батарей фактично складає 90...100 циклів. Звідки видно, що ресурс акумуляторів на порядок відрізняється від ресурсу батарей. Дані обставини обов'язково мають бути враховані під час експлуатації акумуляторних батарей спеціального призначення (космос, авіація, електротранспорт), що пов'язано з високою вартістю акумуляторів (0,8 – 1 тис. грн. за одиницю).

Відмови нікель-кадмієвих батарей обумовлені двома основними причинами:

погіршенням властивості активних мас акумуляторів накопичувати енергію;

розбіжністю характеристик акумуляторів у складі батареї.

Дослідженню механізмів погіршення властивості акумуляторів накопичувати енергію присвячено низку ґрунтовних робіт [1, 2]. Методики відновлювального впливу на стан активних мас розробляються, але на даний час не знайшли широкого застосування у технічній експлуатації батарей спеціального призначення.

Розбіжність характеристик акумуляторів у складі батареї існує на етапі виробництва і збільшується на етапі експлуатації [3]. В ідеальному випадку відсутність розбіжності характеристик акумуляторів може бути досягнута у сферах проектування і виробництва за рахунок комплектації виробником батарей акумуляторами з абсолютно ідентичними характеристиками. У сфері експлуатації авіаційних нікель-кадмієвих батарей існує можливість зменшувати розбіжність характеристик акумуляторів, яка на даний момент не використовується. На цей час ремонт авіаційних нікель-кадмієвих батарей виконується заміною найгіршого акумулятора найкращим. Ті критерії вибору акумуляторів, що використовуються, призначені тільки для відновлення працездатного стану батарей. Наукові підходи до формування методики ремонтної комплектації у широкій літературі не обговорюються.

### Аналіз літератури

Задача ремонтної комплектації авіаційних нікель-кадмієвих батарей може розглядатися, як аналог задачі виробничої комплектації батарей з обмеженої партії акумуляторів [4]. Задача комплектації батарей у виробничій сфері формулюється, як апріорне відшукування такого варіанту виготовлення партії справних батарей, який забезпечує мінімум розбіжності технічних характеристик акумуляторів у складі кожної батареї [4, 5].

Один з найбільш ґрунтовних підходів до вирішення задачі виробничої комплектації полягає у підборі до складу батарей акумуляторів за кінцеви-

ми ділянками їх розрядних характеристик [3]. Підбір пропонується здійснювати за характерними точками кінцевих ділянок розрахункових розрядних характеристик акумуляторів і батарей. Розрахункові розрядні характеристики акумуляторів при цьому мають бути отримані шляхом апроксимації експериментальних даних з використанням математичної моделі, а розрядні характеристики батарей вважаються сумою розрядних характеристик акумуляторів. Експериментальні розрядні характеристики акумуляторів передбачається отримувати індивідуально з використанням автоматизованої багатоканальної апаратури. Критерієм комплектації пропонується вважати факт знаходження характерних точок кінцевих ділянок розрахункових розрядних характеристик акумуляторів у завданому детермінованому інтервалі.

З вищесказаного слідує, що аналогія вирішення задач виробничої і ремонтної комплектації доцільна і дозволяє скоротити трудовитрати на пошук критеріїв останньої. Сутність зазначеної аналогії полягає у обмеженні розбіжності розрахункових розрядних характеристик таких вибірок акумуляторів, що гарантовано складають придатні до подальшої експлуатації батареї. Методика ремонту авіаційних нікель-кадмієвих батарей має враховувати випадковий характер і широкий експлуатаційний діапазон розбіжності розрядних характеристик акумуляторів та містити такі основні дані:

- спосіб апроксимації експериментальних розрядних характеристик акумуляторів;
- критерій збігання розрядних характеристик акумуляторів у складі батарей;
- критерій комплектації працездатних батарей;
- способи вирішення окремих задач ремонтної комплектації.

**Мета статті** – розгляд результатів розробок методики ремонту авіаційних нікель-кадмієвих батарей і критеріїв ремонтної комплектації.

### Основний матеріал

Методика, що пропонується, передбачає вирішення задачі ремонтної комплектації авіаційних нікель-кадмієвих батарей у такій загальній постановці: з партії в кількості  $N$  акумуляторів необхідно скомплектувати  $m$  працездатних батарей по  $n$  акумуляторів таким чином, щоб розбіжність між розрядними характеристиками акумуляторів забезпечувала завдані властивості батарей.

Методика ремонту авіаційних нікель-кадмієвих батарей пропонується у вигляді опису таких технологічних етапів:

- попередня дефектація;
- повна дефектація;
- комплектація;
- контроль якості комплектації.

Попередня дефектація передбачає вилучення з процесу комплектації акумуляторів, дорозрядження і зарядження яких неможливе або недоцільне.

Повна дефектація передбачає проведення контрольного заряду і контрольного розряду та має закінчитись вилученням з процесу комплектації акумуляторів, які недозарядилися, або за формою розрядних характеристик мають очевидні внутрішні вади [1, 2]. Розрядні характеристики повинні бути автоматично виміряні і зареєстровані у цифровій формі. Максимальна помилка виміру напруги – не гірша за 0,001 В, дискретність за часом – не менша за 0,5 с.

Етап комплектації починається з апроксимації експериментальних розрядних характеристик з використанням виразу [6]:

$$U(t) = U_{pk} + R_a I + k \frac{It}{Q - It} + a \left( e^{-b \frac{It}{Q}} - 1 \right), \quad (1)$$

де  $U_{pk}$  – напруга розімкненого кола зарядженого акумулятора, В;

$R_a$  – активний опір акумулятора, Ом;

$I$  – розрядний струм, А;

$Q$  – коефіцієнт, що характеризує залишкову ємність батареї, А·год.;

$k$ ,  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти (розмірність  $k$ ,  $a$  – В, коефіцієнт  $b$  безрозмірний);

$t$  – час розряду в годинах.

За результатами досліджень з'ясовано, що апроксимація експериментальних розрядних характеристик з використанням виразу (1) може бути здійснена розповсюдженими способами, що реалізують метод найменших квадратів. Методика містить розроблений і досліджений автором алгоритм оцінювання коефіцієнтів виразу (1) та прогнозування (за необхідністю) розрядних характеристик недорозряджених акумуляторів з використанням фільтра Калмана. Початкові значення коефіцієнтів і дисперсій рекомендується обирати, виходячи з моделі авіаційної нікель-кадмієвої батареї 20НКБН25-У3, яка враховує випадковий характер і експлуатаційний діапазон розбіжності розрядних характеристик акумуляторів [7].

Акумулятори, для яких значення оцінок коефіцієнтів знаходяться поза експлуатаційним діапазоном (табл. 1), відбраковуються. Значення ємності решти акумуляторів складаються у варіаційний ряд.

Дослідження показали: з відібраної таким чином партії в кількості  $N$  акумуляторів можливо скомплектувати  $m$  працездатних батарей по  $n = 20$  акумуляторів, якщо значення інтервальної оцінки ємності  $Q_6$  кожної батареї не менше мінімально припустимого значення – 21 А·год. Значення ємності батареї з ймовірністю 0,997 буде знаходитись в межах:

Акумулятори, для яких значення оцінок коефіцієнтів знаходяться поза експлуатаційним діапазоном

Урк, В	Ra, Ом	k, В	a, В	b	Q, А·год.
1,325±0,093	-0,002726±0,00161	-0,018±0,158	0,045±0,51	13,459±28,9	≥16

$$q_{сер} \geq Q_6 \geq -1,72 \sigma_a + q_{сер}, \quad (2)$$

де  $q_{сер}$  – середнє значення ємності акумуляторів  $m$ -ї батареї;

$Q_6$  – значення ємності батареї;

1,72 – емпіричний коефіцієнт;

$\sigma_a$  – оцінка середнього квадратичного відхилення ємності акумуляторів батареї.

Вираз (2) отримано емпіричним шляхом. Достовірність результатів забезпечено не менш, ніж 50 тис. кратним числовим розрахунком  $Q_6(\sigma_a, q_{сер})$  для  $q_{сер}$ , що знаходиться в таких межах: 23,5 А·год.  $\leq q_{сер} \leq 33,5$  А·год.

З урахуванням ремонтного запасу  $z$  акумуляторів, кількість акумуляторів у партії може бути представлена у вигляді [4]

$$N = mn + z. \quad (3)$$

Виходячи з виразів (2), (3), пропонується за варіаційним рядом ємностей акумуляторів виконати послідовний перебір варіантів комплектації, під час якого необхідно  $k = z + 1$  разів перевірити виконання такої умови:

$$-1,72 \sigma_{ai} + q_{серi} \geq 21 (\text{А} \cdot \text{год.}), \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (4)$$

Варіанти комплектації, які відповідають умові (4) з ймовірністю 0,997 забезпечують отримання працездатної батареї. Ємності акумуляторів після вказаної операції знов складаються у варіаційний ряд.

Кінцеві варіанти комплектації пропонується обирати в залежності від таких задач експлуатанта, які вважаються ним першочерговими. Розроблено критерії комплектації для вирішення таких задач:

комплектація однієї батареї з мінімальною розбіжністю ємності акумуляторів;

комплектація однієї батареї з максимальною ємністю;

комплектація бортового комплекту батарей з мінімальною розбіжністю ємності між батареями;

комплектація максимальної кількості батарей.

Критерієм комплектації однієї батареї з мінімальною розбіжністю ємності акумуляторів є глобальний мінімум такої функції якості комплектації:

$$\min F_{\sigma_a} = \min (\sigma_{a1}, \sigma_{a2}, \dots, \sigma_{ak}). \quad (5)$$

Комплектація однієї батареї з мінімальною розбіжністю ємності акумуляторів рекомендується експлуатантам у повсякденній діяльності. Результат

вирішення цієї задачі має такі переваги над результатами вирішення решти наведених задач:

стан батареї є найбільш прогнозованим [7];

можливе використання акумуляторів, ємність яких нижче за мінімально припустиму ємність батареї;

зменшується розбіжність характеристик акумуляторів у складі парку батарей частини (підприємства), що дозволяє наблизити ресурс батарей до ресурсу акумуляторів.

Критерієм комплектації однієї батареї з максимальною ємністю є максимум найбільш ймовірного значення ємності  $Q_6$ :

$$\max F_{M[Q_6]} = \max \left( \begin{matrix} M[Q_{61}], \\ M[Q_{62}], \dots, \\ M[Q_{6k}] \end{matrix} \right). \quad (6)$$

Ємність  $M[Q_6]$  є серединою інтервалу (2) і послідовно для  $i$ -ої вибірки розраховується за емпіричною формулою:

$$M[Q_{6i}] = -0,86 \sigma_{ai} + q_{серi}, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (7)$$

Комплектація однієї батареї з максимальною ємністю рекомендується експлуатантам у випадку, коли глобальний мінімум (5) відсутній, або різниця між глобальним і найближчим локальним мінімумом невелика. Критерій (6) в цьому випадку буде допоміжним, а його регулярне використання дозволить підняти ємність парку батарей у середньостатистичному.

У якості критерію комплектації бортового комплекту з  $m$  батареями з мінімальною розбіжністю ємності між батареями пропонується мінімум абсолютної різниці між найбільшим і найменшим значенням  $\sigma_a$   $m$  варіантів комплектації, що не перетинаються:

$$\min F_{\Delta\sigma_a} = \min (\Delta_{\sigma_{a1}}, \Delta_{\sigma_{a2}}, \dots, \Delta_{\sigma_{aC}}). \quad (8)$$

В загальному випадку кількість  $C$  елементів вектору (8) може бути розрахована за формулою [4]:

$$C = \frac{N!}{m!(n!)^m z!}. \quad (9)$$

Методикою рекомендується послідовний пошук мінімуму (8) в області мінімумів (5). Даний підхід відповідає загальній постановці задачі ремонтної комплектації і дозволяє скоротити обсяг розрахунків.

Досвід експлуатації свідчить, що ймовірністю

одночасної відмови двох і більше батарей бортового комплексу можна нехтувати. Виходячи з цього, рекомендованими випадками застосування критерію (8) є:

необхідність тривалої експлуатації комплексу батарей у відриві від основного аеродрому базування;

передісторія технічного стану батарей бортового комплексу невідома.

Як критерій комплектації максимальної кількості батарей пропонується вираз (5), де  $\sigma_a$  – середнє квадратичне відхилення ємності усіх відібраних для комплектації акумуляторів, в кількості  $N - z$  одиниць. При  $N - z = n$  зазначені критерії співпадають. Розробка більш складних критеріїв комплектації максимальної кількості батарей, з урахуванням наявності обмеження  $0 < z < n$ , не виконувалась. Рекомендованим випадком вирішення задачі комплектації максимальної кількості батарей є термінова необхідність ліквідації нестачі працездатних батарей за рахунок внутрішніх резервів експлуатуючої організації.

Контроль якості комплектації передбачено виконувати за результатами контрольного розряду відремонттованих батарей.

### Висновки

Таким чином, результати розробки методики ремонту авіаційних нікель-кадмієвих батарей такі:

розроблено методику ремонту авіаційних нікель-кадмієвих батарей, яка забезпечує отримання працездатних батарей шляхом їх комплектації з партії акумуляторів, що є в наявності. При цьому, в ремонтній комплектації можуть бути використані акумулятори, ємність яких не перевищує мінімально припустиму ємність батареї;

для сукупності акумуляторів, розрядні характеристики яких апроксимовані з використанням моделі (1) і оцінки її коефіцієнтів при цьому знаходяться у робочому діапазоні (таблиця 1), варіанти комплектації, що відповідають умові (4), з ймовірністю 0,997 забезпечують отримання працездатної батареї;

наближення ресурсу нікель-кадмієвих батарей до ресурсу акумуляторів в умовах експлуатуючої організації можливе за рахунок регулярного вирішення задачі комплектації однієї працездатної батареї з мі-

німальним середнім квадратичним відхиленням ємності акумуляторів (5).

### Напрямки подальших досліджень

Основним напрямком подальших досліджень є обґрунтування стратегії технічної експлуатації парку акумуляторів експлуатуючої організації. Такі дослідження мають кількісно визначити можливу ступінь наближення ресурсу нікель-кадмієвих батарей до ресурсу акумуляторів, що їх складають, в експлуатаційних умовах.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кромптон Т. Вторичные источники тока: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 304 с.
2. Теньковцев В.В., Борисов Б.А., Ткачева А.Ш. Влияние режима эксплуатации на стабильность характеристик герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов // Исследования в области электрохимической энергетики: Сб. науч. тр. ВНИИАИ. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 59 – 70.
3. Хаскина С.М., Даниленко И.Ф. Алгоритм машинной комплектации батарей никель-кадмиевых герметичных аккумуляторов // Исследования в области электрических аккумуляторов: Сб. науч. тр. ВНИИАИ. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 128 – 134.
4. Таганова А.А. О выборе технических средств для автоматической комплектации батарей // Химические источники тока: Сб. науч. тр. ВНИИАИ. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – С. 76 – 80.
5. Мартынов А.Л., Стариков Б.А. Задачи комплектации аккумуляторных батарей // Технология производства химических источников тока: Сб. науч. тр. ВНИИАИ. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 97 – 100.
6. Хаскина С.М., Даниленко И.Ф. Математическое моделирование разрядных характеристик химических источников тока // Сборник работ по химическим источникам тока: Сб. науч. тр. ВНИИАИ. – Л.: Энергоатомиздат, 1981. – С. 34 – 38.
7. Маренич С.Ю., Ругаль А.І. Вплив параметрів нікель-кадмієвих акумуляторів на ємність акумуляторних батарей // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2006. – Вип. 2(8). – С. 58 – 60.

Надійшла 28.04.2006

Рецензент: д-р техн. наук професор В.Є. Овчаренко, Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, Харків.