

УДК 621.311.012

С.Ю. Маренич, А.І. Ругаль

## ЕВРИСТИЧНА ЕКСТРАПОЛЯЦІЯ РОЗРЯДНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НІКЕЛЬ-КАДМІЄВИХ АКУМУЛЯТОРІВ

*Розглядається завдання визначення ємності акумуляторів нікель-кадмієвої електрохімічної системи за неповною розрядною характеристикою. Таке завдання вирішується під час ремонту батарей шляхом перекомплектації. Одним із шляхів його вирішення пропонується використання евристичної екстраполяції. Визначені мінімальні похибки евристичної екстраполяції.*

### Постановка проблеми

Розрядна характеристика акумуляторних батарей та акумуляторів дозволяє визначити суттєвий параметр їх технічного стану – фактичну ємність. Це найважливіший параметр, який характеризує здатність батареї чи акумулятора бути використаним за призначенням. Для тривалого використання батареї акумулятори, з яких вона складається, повинні мати якщо не однакову ємність, то близьку до цього. Це враховується як при комплектації батарей на підприємстві-виготовлювачі, так і при ремонті батарей шляхом перекомплектації.

Визначення ємності батареї здійснюється при контрольному розряді. При цьому використовується один канал стабілізації струму та один канал вимірювання напруги. Тривалість контрольного розряду для авіаційних акумуляторних батарей типу 20НКБН-25У3 складає близько 2,5 години.

Інша ситуація спостерігається при визначенні ємності акумуляторів. Для перекомплектації комплексу з 2 – 3 батареї 20НКБН-25У3 необхідно визначити ємність більше 40 – 60 акумуляторів. При наявності 10 каналів стабілізації струму та визначенні ємності при окремому розряді кожного акумулятора тривалість робіт перевищить 10...15 годин. З метою скорочення часу на визначення ємності окремих акумуляторів та усунення похибки стабілізації струму доцільно проводити розряд при послідовному з'єднанні акумуляторів з використанням одного каналу стабілізації струму та кількості каналів вимірювання напруги відповідно до кількості акумуляторів. Але при цьому, внаслідок розбіжності ємності акумуляторів, після завершення розряду за будь-яким критерієм, крім критерію “всі розряджені”, залишаться акумулятори, ємність яких точно не визначена.

### Аналіз літератури

Визначення ємності акумуляторів, контрольний розряд яких був закінчений раніше, ніж напруга досягла необхідного рівня, є задачею екстраполяції. Це

завдання може бути вирішене двома шляхами:

розрахунковим – за допомогою різноманітних алгоритмів екстраполяції;

евристичним – без використання будь-яких розрахунків.

Розрахункова екстраполяція може здійснюватись з використанням математичних моделей зміни напруги акумуляторів під час розряду постійним струмом [1, 2], з використанням похідних за часом напруги [3] чи іншими способами, які передбачають проведення розрахунків [4].

Евристична екстраполяція розрядної напруги здійснюється оператором лише на підставі графічної залежності зміни напруги у часі. Питання евристичної екстраполяції розрядної напруги акумуляторів в літературі широко не розглядається.

**Мета статті** – визначення мінімальної похибки евристичної екстраполяції розрядної напруги.

### Формулювання задачі

Для визначення точності евристичної екстраполяції оператору необхідно представляти для огляду розрядні характеристики акумуляторів. Для отримання вірогідних результатів необхідно використовувати більше 100 характеристик у кожному з експериментів. Тому використання розрядних характеристик, отриманих експериментальним шляхом, недоцільно.

Розрядні характеристики акумуляторів можуть бути отримані за допомогою їх математичної моделі, яка враховує випадковість значення ємності:

$$U(t) = U_0 - RI - k \frac{It}{Q - It} + a \left( e^{-b \frac{It}{Q}} - 1 \right), \quad (1)$$

де  $U_0 = 1,465$  В – початкова напруга;

$R = 0,0108...0,012$  Ом – активний опір;

$I = 10$  А – розрядний струм;

$Q = 25...30$  А·год – коефіцієнт, що характеризує розрядну ємність акумулятора;

$k = 0,008398...0,009328$  В;

$a = 0,05 \dots 0,08 \text{ В};$   
 $b = 6,267$  – коефіцієнти;  
 $t$  – час розряду в годинах.

Обрані в моделі (1) коефіцієнти відповідають розрядній характеристиці авіаційного нікель-кадмієвого акумулятора батареї 20НКБН-25УЗ та розраховані за експериментальними даними, які отримані авторами. Значення коефіцієнтів у межах указаних діапазонів є випадковими з рівномірним законом розподілення та некорельованими між собою. Такий підхід дозволяє враховувати розбіжність технічного стану справних акумуляторів. На рис. 1 наведені типові розрядні характеристики акумуляторів, що отримані за моделлю (1).

Таким чином, оператор на інтервалі розрядної характеристики від  $t = 0$  до  $t = T$  годин повинен визначити час  $t_k$ , коли  $U(t_k) = 1 \text{ В}$ . На рис. 2 частина розрядних характеристик, які оператор не бачить, позначена точками.

### Результати досліджень

Дослідження виконувались за допомогою ПЕОМ та моделюючої програми. Помилка визначення ємності

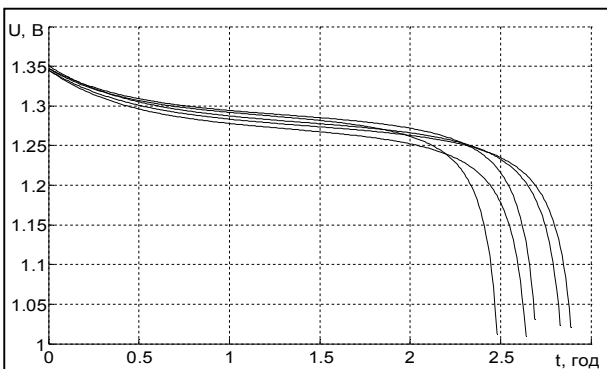


Рис. 1. Типові розрядні характеристики нікель-кадмієвих акумуляторів

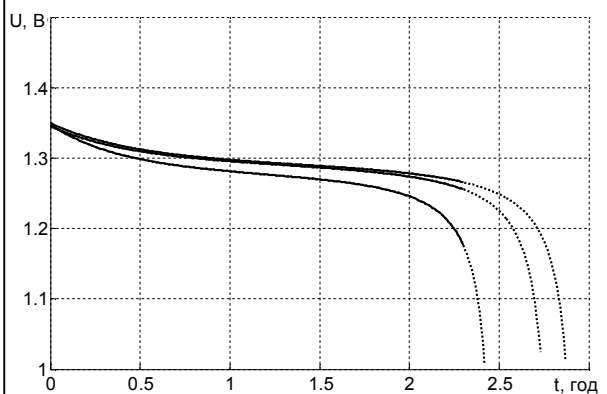


Рис. 2. Приклад частин розрядних характеристик, які наводяться оператору

сті в разі надання оператору повної розрядної характеристики не перевищує  $0,04 \text{ А} \cdot \text{год}$ , що складає  $0,16 \%$  від номінальної ємності. Ця помилка обумовлена неточністю виставлення оператором маркера, що визначає прогноз ємності, внаслідок його дискретного положення на екрані монітора.

Помилка екстраполяції розрядних характеристик розраховувалась як різниця фактичної ємності та ємності, яка визначена оператором за умови, що йому надана розрядна характеристика акумулятора від  $t = 0$  до  $t = T$  годин:

$$\Delta Q = Q_{\text{ф}} - Q_{\text{ек}}, \quad (2)$$

де  $\Delta Q$  – помилка визначення ємності;

$Q_{\text{ф}}$  – фактична ємність;

$Q_{\text{ек}}$  – ємність, яка визначена оператором.

Дослідженнями встановлено, що при  $T < 2$  годин оператори відмовляються від здійснення будь-якого прогнозу. Це пов'язано з малим значенням швидкості зміни напруги, коли справний акумулятор віддав менше  $70 \%$  ємності. Враховуючи, що при ємності акумулятора менше  $21 \text{ А} \cdot \text{год}$  він до подальшої експлуатації не допускається, значення  $T$  обрано  $2,3$  години. За  $2,3$  години акумулятор, який вже був в експлуатації, віддає в середньому  $75 \dots 95 \%$  номінальної ємності.

На рис. 3 наведена помилка екстраполяції розрядних характеристик операторами різного рівня підготовки: від фахівців, які тривалий час працюють з акумуляторними батареями та неодноразово проводили контрольні-тренувальні цикли саме на батареях 20НКБН-25УЗ, до фахівців в інших галузях, що не мають відповідного досвіду. Наведені помилки враховують також процес "навчання".

З рис. 3 видно, що в середньому оператори схильні занижувати більші значення ємності та збільшувати менші. Це пов'язано з обмеженістю діапазону ємності, яку може задати оператор значеннями

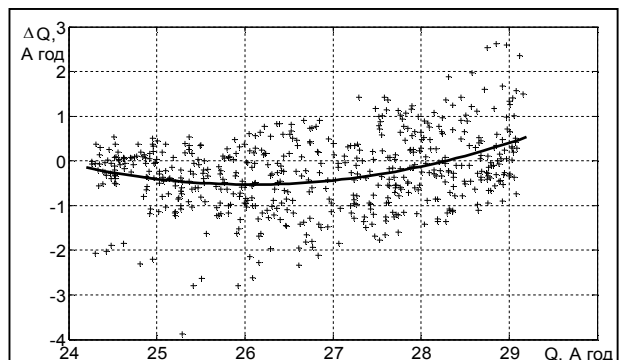


Рис. 3. Помилки екстраполяції розрядних характеристик різними операторами:

+ – помилка екстраполяції;

— – крива, що апроксимує

23...30 А·год. Випадки значних помилок до 4 А·год пов'язані з процесом навчання. Середнє квадратичне відхилення помилки визначення ємності операторами складає 0,83 А·год.

На рис. 4 наведені помилки екстраполяції розрядних характеристик досвідченим оператором. На відміну від умов попереднього експерименту оператору також надавалась інформація про фактичну ємність, яку він намагався визначити минулого разу. Передбачалось, що такий режим надання інформації дозволить підвищити точність екстраполяції за рахунок ефекту навчання. Середнє квадратичне відхилення помилки визначення ємності оператором складає 0,53 А·год. Незважаючи на підвищення точності в середньому, випадки значних помилок до 2 А·год мають місце.

Під час експериментів було встановлено, що для екстраполяції оператори використовують лише деяку кінцеву частку розрядної кривої. Це підтверджує експеримент, результати якого наведені на рис. 5. У ньому розрядна характеристика надавалась

операторові лише на ділянці від 2 до 2,3 години. Точність прогнозу ємності при цьому майже не погіршується порівняно з попередніми експериментами.

Одним із шляхів поліпшення умов роботи оператора є надання йому шаблонів типових розрядних характеристик, що відповідають різній ємності акумуляторів. Картина, яку бачить при цьому оператор, наведена на рис. 6. Шаблони надають оператору додаткову інформацію про характер динаміки розрядної характеристики. Використання шаблону оператором не передбачає будь-яких розрахунків, тому евристичність екстраполяції зберігається.

Як видно з рис. 7, незважаючи на надання оператору шаблонів точність екстраполяції значно не підвищується. Як і в попередніх експериментах оператор у середньому занижує значення для більших фактичних значень ємності. В результаті спостере-

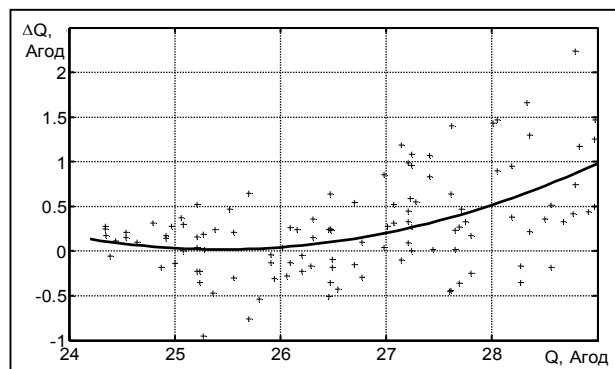


Рис. 4. Помилки екстраполяції розрядних характеристик досвідченим оператором:  
+ – помилка екстраполяції;  
— – крива, що апроксимує

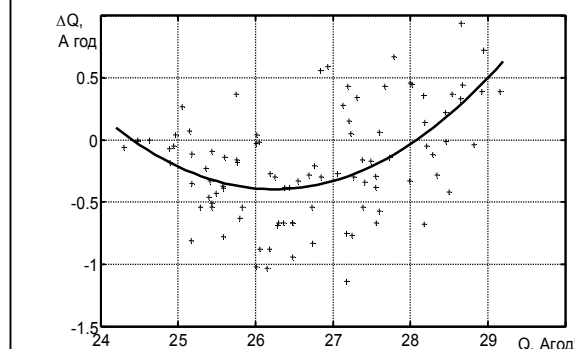


Рис. 5. Помилки екстраполяції розрядних характеристик досвідченим оператором при  $t$  від 2 до 2,3 години:  
+ – помилка екстраполяції;  
— – крива, що апроксимує

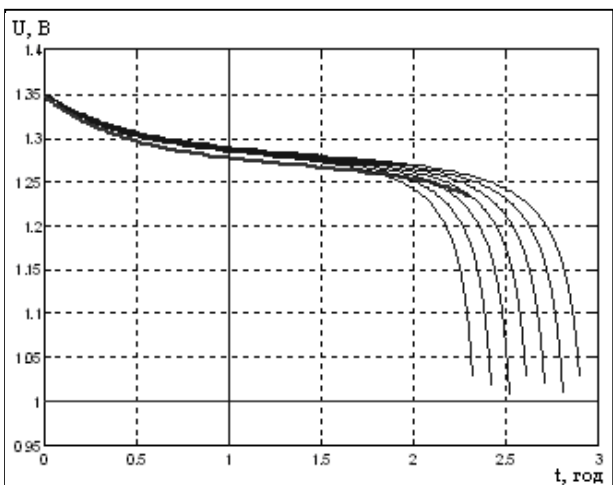


Рис. 6. Частина розрядної характеристики з шаблонами, що надаються операторові:  
1 – частина розрядної характеристики;  
2 – шаблони

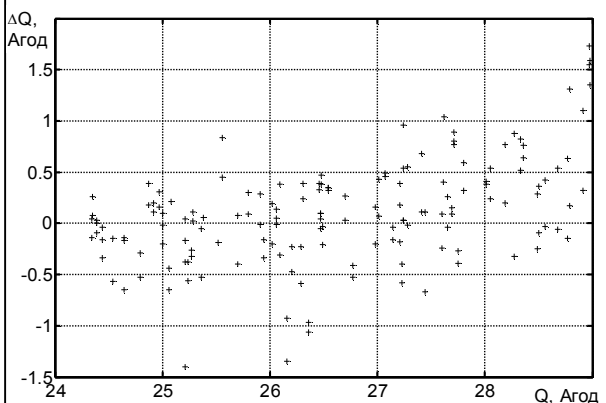


Рис. 7. Помилки екстраполяції розрядних характеристик досвідченим оператором при наявності шаблонів

жень за операторами при виконанні даного експеримента встановлено, що при наявності шаблонів оператор використовує інформацію про розрядну характеристику в цілому. Однак шаблони в цьому експерименті були генеровані за середніми невідповідними значеннями коефіцієнтів моделі (1). Тому при незбіжності форми розрядної характеристики з формою шаблонів умови екстраполяції не змінюються.

Принципово інша ситуація спостерігається в разі, коли оператору надається не фіксований шаблон розрядної характеристики, а шаблон, який генерований за моделлю (1). При цьому оператор має можливість генерувати шаблон для однієї розрядної характеристики багато разів, поки не прийме рішення.

Результати експерименту для такого випадку наведені на рис. 8. Середнє квадратичне відхилення помилки визначення ємності оператором складає 0,22 А·год. Природно, що в такій постановці експерименту час, який використовує оператор для здійснення прогнозу, значно збільшується і складає в середньому до 2...5 хвилин на одну розрядну характеристику.



### Висновки

1. Визначення операторами різного рівня підготовки ємності нікель-кадмієвих акумуляторів за частиною розрядної характеристики від 0 до 75...95 % фактичної ємності неможливе краще за середнє квадратичне відхилення помилки 0,83 А·год при від-

сутності додаткової інформації про динаміку розрядних характеристик.

2. Без надання шаблонів розрядних характеристик без погіршення точності оператори використовують для екстраполяції лише кінцеву частину розрядної характеристики об'ємом 5...10 %.

3. Максимальна точність евристичної екстраполяції розрядної характеристики може бути досягнута при генерації шаблону за моделлю (1). Середнє квадратичне відхилення помилки при цьому складає 0,22 А·год. Тривалість роботи оператора з екстраполяції однієї розрядної характеристики складає 2...5 хвилин, що для батареї з 20 акумуляторів складає 40...100 хвилин.

### Перспективи подальших досліджень

На підставі проведених досліджень для рішення задачі ремонту акумуляторних батарей шляхом переконфигурації доцільна розробка алгоритмів автоматизації процесу екстраполяції розрядних характеристик акумуляторів нікель-кадмієвої електрохімічної системи з використанням пошукових алгоритмів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Применение цифровой фильтрации сигналов для алгоритмов расчета времени до конца разряда аккумуляторной батареи в условиях недостатка априорной информации / В.И. Марчук, В.М. Горбачев и др. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2002. – № 6. – С. 65 – 71.
2. Gregory L. Plett., Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs // Journal of Power Sources. – 2004. – V. 134. – P. 252 – 292.
3. Маренич С.Ю., Ругаль А.І. Методичні помилки прогнозування розрядної напруги акумуляторної батареї з використанням ряду Маклорена // Зб. наук. пр. ХУ ПС. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 1 (1). – С. 12 – 16.
4. Eberhard Meissner, Gerolf Richter Vehicle electric power systems are under change. Implications for design, monitoring and management of automotive batteries // Journal of Power Sources. – 2001. – P. 13 – 23.

Надійшла 07.10.2005

Рецензент: д-р техн. наук професор О.М. Фоменко, Харківський університет Повітряних Сил.