

УДК 621.355.1

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СБОРКИ
АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАБОРАТОРИИ
SIMULATION OF SERIAL-PARALLEL CONNECTION OF BATTERIES IN
THE ELECTRONIC LABORATORY**

А.В. Борщевский

Научный руководитель – Ю.В. Бладыко, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

eie@bntu.by

A. Borshchevsky

Supervisor – Y. Bladyko, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: В работе рассматривается моделирование процессов заряда-разряда сборок аккумуляторных батарей с учетом их деградации. Приводятся результаты симулирования циклической работы сборок батарей в электронной лаборатории *Electronics Workbench*. При моделировании учитывалось наличие в сборке одной «дефектной» батареи. Работа такой сборки сравнивалась с работой эталонной сборки. Рассматривалось последовательно-параллельное соединение батарей.

Abstract: The paper deals with the modeling of the processes of charge-discharge of battery connections, taking into account their degradation. The results of simulating the cyclic operation of battery connections in the *Electronics Workbench* electronic laboratory are presented. The simulation took into account the presence of one “defective” battery in the connection. The performance of such battery was compared with the performance of a reference one. A series-parallel connection of batteries was considered.

Ключевые слова: аккумулятор, заряд, разряд, емкость, соединение.

Keywords: battery, charge, discharge, capacity, connection.

Введение

В электронной лаборатории *Electronics Workbench* (EWB) [1], была построена модель ячейки аккумуляторной батареи (АКБ). Программная среда предоставляет виртуальные инструменты: рабочий стол; библиотеку компонентов - аналоговых и цифровых устройств; контрольно-измерительные приборы; набор команд, обеспечивающих выполнение расчетов и выдачу на экран дисплея результатов моделирования в виде таблиц и графиков [2].

На рисунке 1 представлена модель аккумулятора в EWB [3]. Модель аккумулятора в EWB выполнена в виде подцепи ак. Ее основными элементами являются конденсатор C , сопротивление утечки $R_{ут}$, внутреннее сопротивление АКБ $R_{внут}$. Для контроля тока АКБ в модель включен преобразователь тока в напряжение *Current-Controlled Voltage Source* $I*1$ Ohm. Для регистрации изменения заряда АКБ используется блок *Voltage Gain Block* с коэффициентом усиления напряжения, равным емкости конденсатора $K = C$.

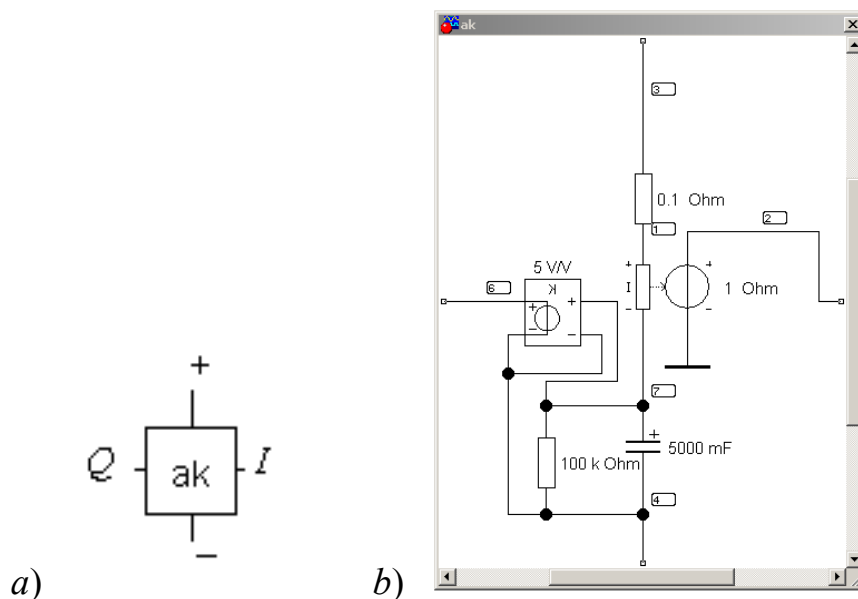


Рисунок 1 – Модель АКБ: *a* – аккумулятор в виде подцепы ак; *b* – подцепь ак: 1 – внутреннее сопротивление, 2 – индикатор тока на основе генератора напряжения, управляемого током, 3 – плюсовая клемма, 4 – минусовая клемма, 6 – индикатор заряда на основе *Voltage Gain Block*

Основная часть

Рассмотрим поведение сборок 2x2 для случая последовательно-параллельного подключения (рисунок 2).

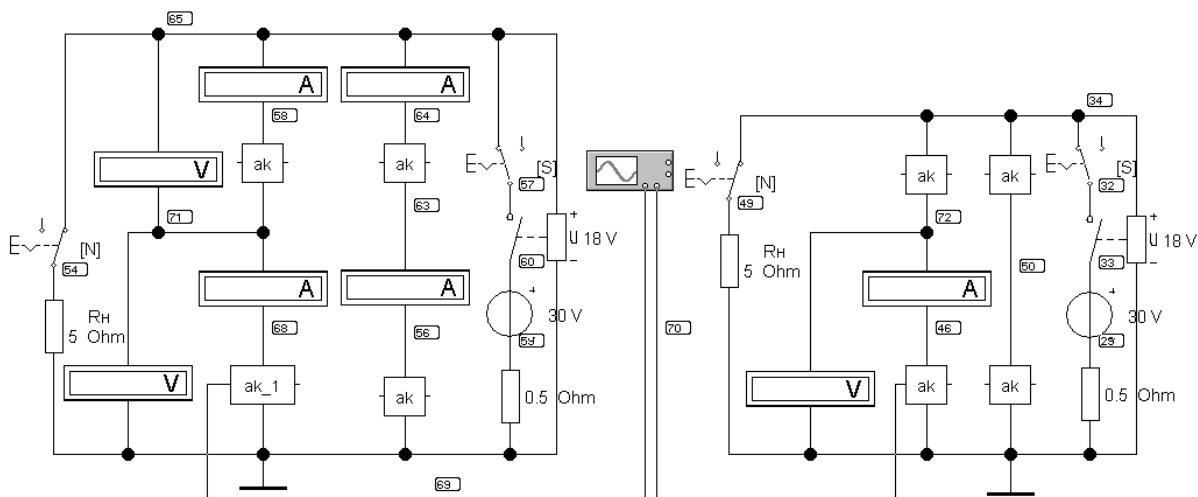


Рисунок 2 – Последовательно-параллельная сборка 4-х АКБ. Слева – исследуемая сборка с «дефектной» АКБ ак_1, справа – эталонная сборка

Моделирование проводилось в электронной лаборатории Electronics Workbench по схеме, описанной в [3], с использованием критерия подобия. Емкость конденсатора моделирующего АКБ составляла 5 Ф, что соответствует емкости АКБ 60 А·ч напряжением 12 В при замене размерности оси времени с секунд на часы. Одновременно моделировались две сборки: эталонная сборка (на рисунке 2 справа), состоящая из одинаковых АКБ ак с номинальными параметрами

(5 Ф, что соответствует 60 А·ч, внутреннее сопротивление 0,1 Ом); тестируемая сборка (на рис. 2 слева) с одной «дефектной» АКБ ak_1 с уменьшенной на 10 % емкостью (4,5 Ф, что соответствует 54 А·ч) и увеличенным внутренним сопротивлением 0,15 Ом.

На рисунке 3 представлена временная диаграмма состояния заряда исправного АКБ в эталонной сборке в ходе зарядно-разрядного циклирования и соответствующая диаграмма состояния заряда «дефектной» АКБ в тестируемой сборке. На графике виден тренд деградации емкости «дефектной» АКБ.

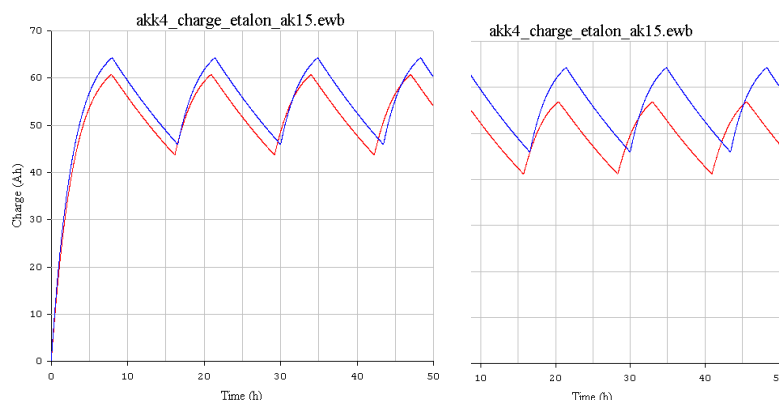


Рисунок 3 – Временная диаграмма состояния заряда исправной АКБ (синяя линия) в эталонной сборке и «дефектной» АКБ (красная линия). Правая часть – с учетом деградации параметров со временем

На рисунке 3 показано изменение заряда (емкости АКБ) в процессе нескольких циклов заряда-разряда с первоначальной деградацией параметров (левая часть) и с прогрессирующей деградацией (правая часть). В ходе циклирования происходит ускоренная деградация «дефектной» АКБ - дальнейшее уменьшение емкости с 4,5 до 4 Ф (до 48 А·ч) и увеличение внутреннего сопротивления с 0,15 до 0,2 Ом. Деградация параметров видна на рис. 3 и будет наблюдаться также на последующих рисунках.

На рисунке 4 представлена временная диаграмма состояния заряда «дефектной» АКБ и расположенной с ней параллельно в сборке нормальной АКБ.

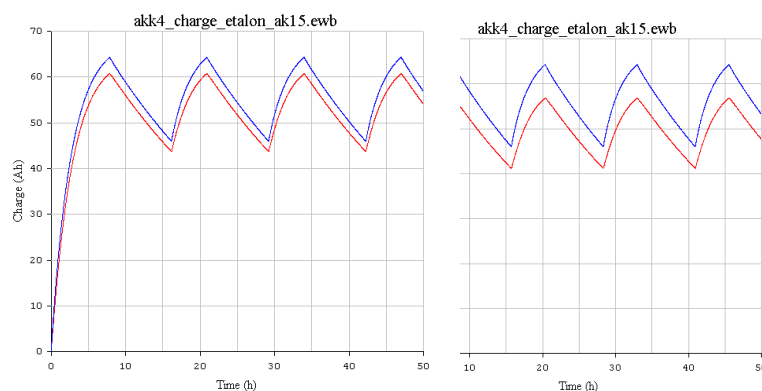


Рисунок 4 – Временная диаграмма состояния заряда исправной АКБ (синяя линия) и расположенной с ней параллельно «дефектной» АКБ (красная линия). Правая часть – с учетом деградации параметров со временем

На рисунке 5 представлена временная диаграмма состояния заряда «дефектной» АКБ и подключенной с ней последовательно в сборке нормальной АКБ.

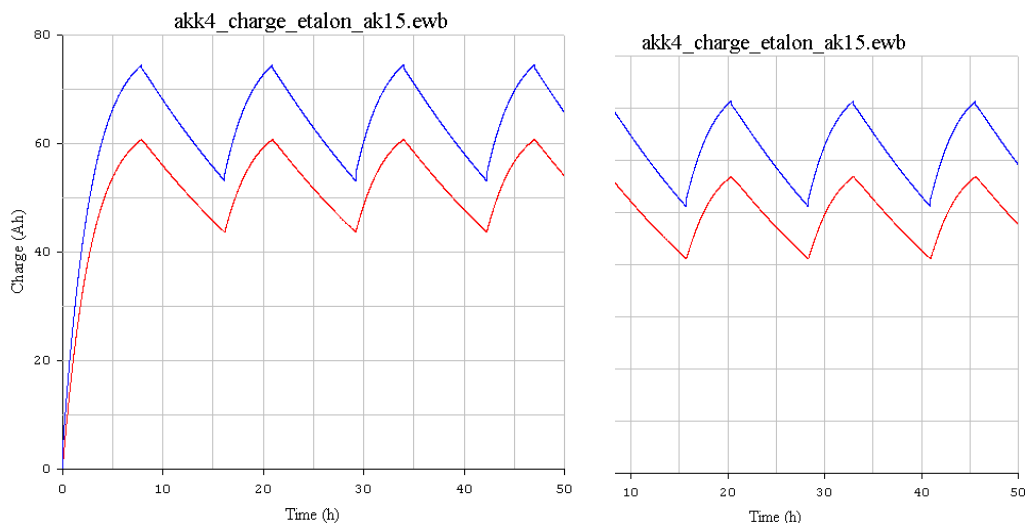


Рисунок 5 – Временная диаграмма состояния заряда исправной АКБ (синяя линия) и подключенной с ней последовательно «дефектной» АКБ (красная линия).
Правая часть – с учетом деградации параметров со временем

На рисунках 6 – 9 представлены временные диаграммы изменения напряжений и токов «дефектной» АКБ по сравнению с изменениями эталонной и подсоединенных с ней последовательно и параллельно.

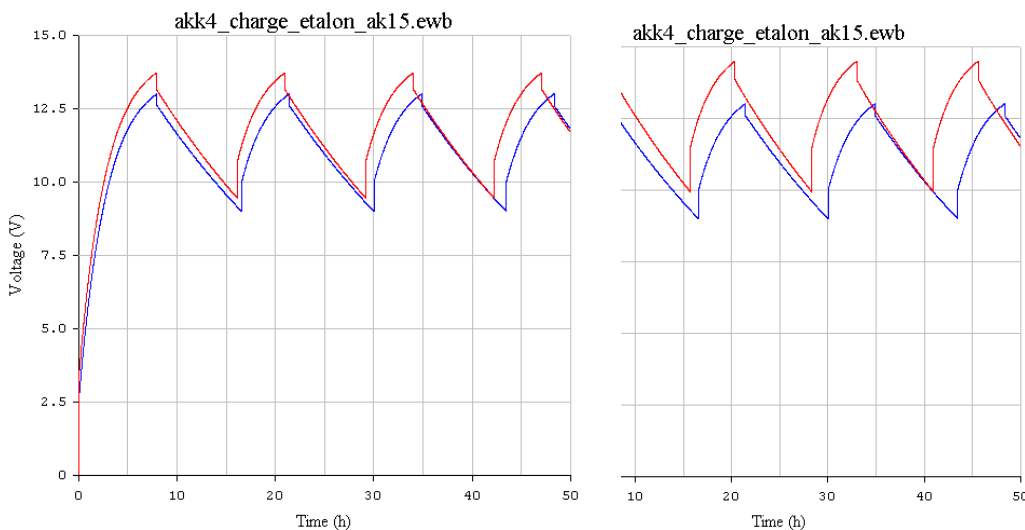


Рисунок 6 – Временная диаграмма напряжения исправной АКБ (синяя линия) в эталонной сборке и «дефектной» АКБ (красная линия).
Правая часть – с учетом деградации параметров со временем

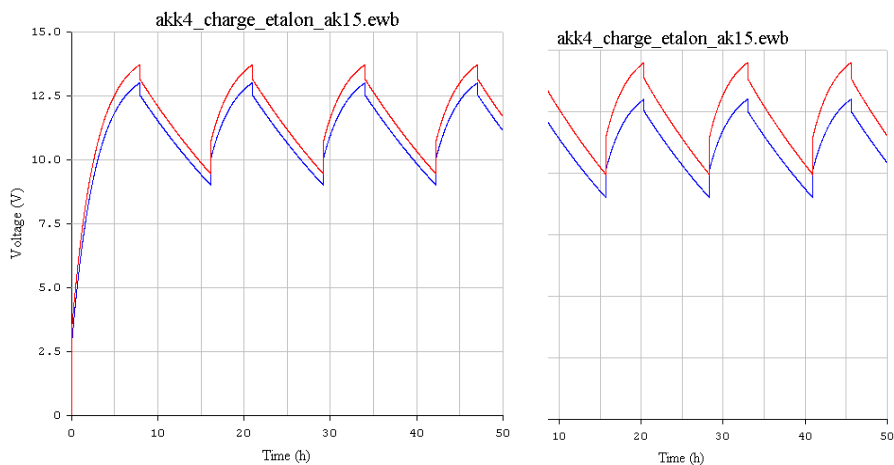


Рисунок 7 – Временная диаграмма напряжения исправной АКБ (синяя линия) и расположенной с ней параллельно «дефектной» АКБ (красная линия).
Правая часть – с учетом деградации параметров со временем

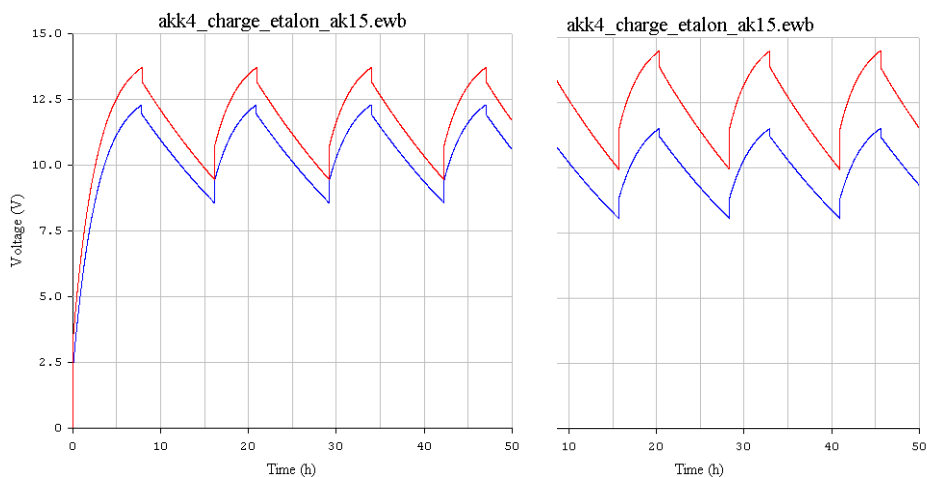


Рисунок 8 – Временная диаграмма напряжения исправной АКБ (синяя линия) и подключенной с ней последовательно «дефектной» АКБ (красная линия).
Правая часть – с учетом деградации параметров со временем

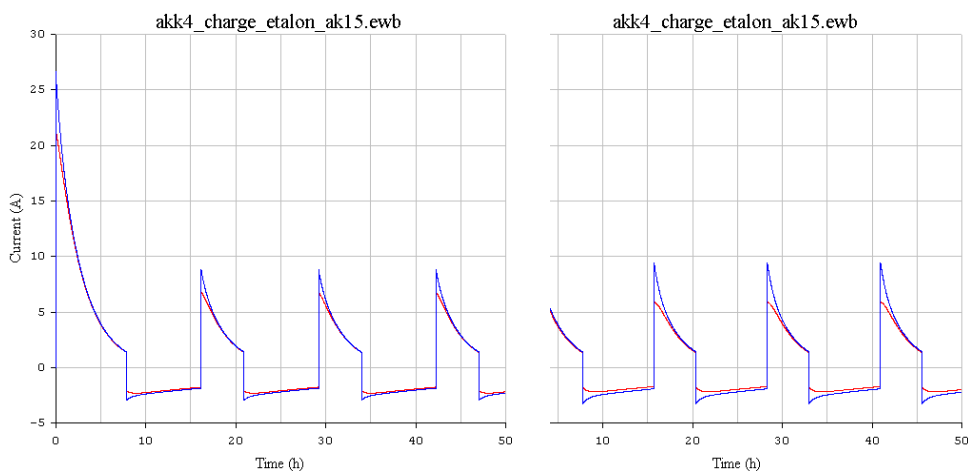


Рисунок 9 – Временная диаграмма тока исправной АКБ (синяя линия) и расположенной с ней параллельно «дефектной» АКБ (красная линия).
Правая часть – с учетом деградации параметров со временем

Анализ графиков показывает, что наличие «дефектной» АКБ в сборке приводит к перераспределению токов и напряжений. Возрастает напряжение на «дефектной» АКБ, на остальных исправных АКБ напряжение понижается. Большая токовая нагрузка ложится на АКБ, расположенные параллельно дефектной. Параллельные «дефектной» АКБ помогают ей заряжаться, увеличивая свой ток разряда. Увеличиваются потери мощности у деградировавшей батареи.

Заключение

Уменьшение емкости «дефектной» АКБ на 10 % и увеличение сопротивления дефектной АКБ (внутреннее сопротивление выросло с 0,1 до 0,15 Ом) приводит к сокращению времени разряда исследуемой сборки на 3,5 % по сравнению со временем разряда эталонной сборки. При дальнейшей деградации (уменьшение емкости на 20 % от эталонной и увеличение внутреннего сопротивления с 0,15 до 0,2 Ом) время разряда исследуемой сборки уменьшается на 6,9 % по сравнению со временем разряда эталонной сборки. Отличие напряжения по сравнению с напряжением эталонной батареи составляет 4,9 %, при прогрессировании деградации возрастает до 10,5 %. Если сравнивать напряжения «дефектной» АКБ и последовательно включенной, то разница напряжения возрастает при деградации с 10,3 % до 23,4 %. Потери мощности в «дефектной» АКБ возрастают при этом на 20 %.

Литература

1. Карлашук, В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 800 с.
2. Бладыко, Ю.В. Электроника. Практикум. Мн.: ИВЦ Минфина, 2016. 190 с.
3. Доброго, К.В. Моделирование сборок аккумуляторных батарей в электронной лаборатории / К.В. Доброго, Ю.В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 1. С. 27-39.