

УДК 53.06

Исследование характеристик литий-ионной аккумуляторной батареи

П. В. Борисов¹, А. А. Воробьев¹, К. В. Константинов², И. К. Самаркина¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина), Российская Федерация, 197376, Санкт-Петербург, Инструментальная ул., 2

Для цитирования: Борисов П. В., Воробьев А. А., Константинов К. В., Самаркина И. К. Исследование характеристик литий-ионной аккумуляторной батареи // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 207–221. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-207-221

Аннотация

Цель: Проведение исследования по получению данных, связывающих напряжение литий-ионной аккумуляторной батареи с возмущающими воздействиями протекающего тока, синтез схемы замещения накопителя, получение алгоритма расчета параметров элементов схемы замещения по экспериментальным данным с последующей проверкой адекватности модели. **Методы:** Прогнозирование работы литий-ионной аккумуляторной батареи по средствам формы напряжения из-за возмущающих воздействий протекающего синусоидального и скачкообразного пульсирующего тока. Модели ячеек в виде эквивалентных схемы замещения дающие представления о состоянии аккумулятора, хоть и не обладающие всеми характеристиками физической модели батареи. **Результаты:** Рассмотрен алгоритм синтеза схемы замещения литий-ионной аккумуляторной батареи, проведен физический эксперимент по нахождению параметров схемы замещения, составлена математическая модель по результатам исследования, подтверждена ее адекватность. **Практическая значимость:** Проведенное исследование дало возможность отработки алгоритма расчета параметров для формирования алгоритма функциональной диагностики литий-ионных аккумуляторных батарей.

Ключевые слова: Литий-ионная аккумуляторная батарея, функциональная диагностика, схема замещения, внутреннее сопротивление аккумулятора.

Введение

Диагностика литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) дает возможность наблюдения за текущим состоянием аккумуляторных батарей, в том числе за снижением остаточного ресурса. [1] Таким образом возможно спрогнозировать количество оставшихся циклов, что позволит использовать повторно отработанный накопитель, в случае если его характеристики будут соответствовать эксплуатационным значениям.

При переходе от рассмотрения структуры аккумулятора к анализу электрических характеристик прежде всего возникает задача синтеза схемы замещения. Синтезом электрической цепи называют определение структуры цепи и числовых значений, составляющих ее пассивных (R, L, C) и активных (источников ЭДС и тока) элементов по временным характеристикам, при воздействии на вход импульса известной формы, либо известным описанием цепи в операторной форме. Однако одному и тому же состоянию аккумулятора, принятому в качестве

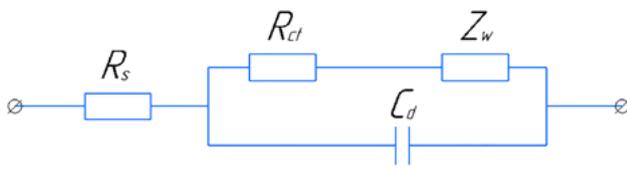


Рис. 1. Схема Рендлса как пример схемы ячейки

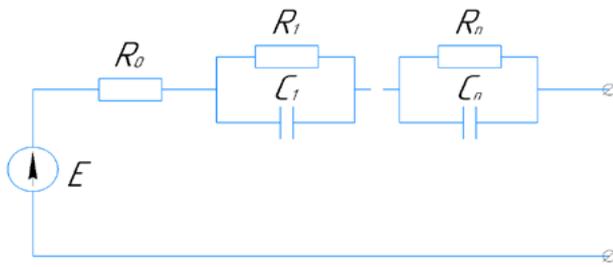


Рис. 2. Схема замещения ЛИА

исходного, могут соответствовать несколько различных схем разной структуры [2].

Известна связь [3] между изменением структуры слоев аккумуляторной батареи ее внутренним сопротивлением Z . В литературе [4, 5] встречаются модели эквивалентных схем, например схема Рендлса, которая нередко приводится как пример эквивалентной схемы элемента аккумуляторной батареи (рис. 1).

Схема Рендлса представляет собой эквивалентную электрическую цепь ЛИА, которая состоит из [6]:

- R_s — активного сопротивления электролита;
- R_{ct} — сопротивления переноса заряда, моделирующего падение напряжения на границе «электрод — электролит» из-за нагрузки;
- C_{dl} — емкость, моделирующая эффект зарядов, накапливающихся в электролите на поверхности электрода;
- Z_w — импеданс Варбурга. Сопротивление Варбурга моделирует диффузию ионов лития в электродах.

Для эквивалентности схемы замещения необходимо бесконечное число резисторно-конденса-

торных цепей, однако схему можно упростить. Поскольку емкость двойного слоя оказывает незначительное влияние на характеристики схемы Рендлса на низких частотах, ей можно пренебречь, а импеданс Варбурга заменить конечным числом параллельных цепей «резистор — конденсатор», соединенных последовательно. Тогда модель ячейки сводится к схеме замещения с дополнительными парами «резистор — конденсатор», изображенной на рис. 2 [7, 8].

Схема замещения позволяет использовать характеристики ее элементов в качестве параметров диагностики ЛИА. Для понимания процессов, происходящих в аккумуляторной батарее, необходимо рассмотреть структуру накопителя как электрической цепи со своими параметрами и свойствами.

При использовании способа построения цепи замещения ЛИА с помощью элементов, описывающих работу аккумуляторной батареи, любое расхождение между цепью замещения и наблюдаемым физическим объектом считается ошибкой моделирования. Данная ошибка моделирования анализируется, для ее уменьшения данные уточняются, пока уровень ошибки не снизится, чтобы его можно было идентифицировать как «достаточно хороший».

Можно решать обратную задачу: подбирать структуру и параметры схемы замещения для исследуемой аккумуляторной батареи так, чтобы при заданном законе изменения во времени входной величины $x_{вх}(t)$ получить заданный закон изменения во времени выходной величины $x_{вых}(t)$. Переходя к лапласовым изображениям $X_{вх}(p) = L\{x_{вх}(t)\}$ и $X_{вых}(p) = L\{x_{вых}(t)\}$, получим заданную передаточную функцию цепи

$$K(p) = \frac{X_{вых}(p)}{X_{вх}(p)}. \text{ Тогда задачу можно поставить}$$

следующим образом: по заданной передаточной функции $K(p)$, а также по заданной частотной

характеристике $K(j\omega)$ нужно найти структуру цепи и ее параметры [9].

Рассмотрим аккумуляторный накопитель как двухполюсник — «черный ящик» (см. рис. 3). В качестве входной величины принимается ток заряда (разряда) ЛИА $I_1(j\omega)$, а напряжение на зажимах $U_1(j\omega)$ — в качестве выходной величины.

Представленный на рис. 3 двухполюсник ЛИА в качестве «черного ящика» включает в себя сопротивление Z и E — источник ЭДС. Z отражает накопленный заряд и энергию, выделяемую в виде тепл на аккумуляторной батарее, а E представляет собой напряжение разомкнутой цепи аккумуляторной батареи.

Для данного двухполюсника в качестве передаточной функции можно выбрать $Z(j\omega)$ или обратную ему величину — входную проводимость $Y(j\omega)$, которую можно назвать переменной характеристикой цепи (1):

$$K(j\omega) = \frac{U_1(j\omega)}{I_1(j\omega)} = Z(j\omega). \quad (1)$$

Все ранее описанное позволяет привести схему замещения ЛИА к г-образной. Двухполюсник аккумуляторной батареи путем выделения простейших элементных составляющих будет иметь вид, представленный на рис. 4.

На схеме замещения ЛИА, представленной на рис. 4:

- сопротивление R представляет сопротивление электродов;
- двухполюсник R_1C_1, R_nC_n , представляющий межполюсное пространство, заполняемое электролитом, с емкостью C_1, C_n , и сопротивлением R_1, R_n , которое во время работы проявляется в виде тепла, выделяемого ЛИА;
- ЭДС ЛИА E представляет собой разность потенциалов между электродами.

Индуктивностью можно пренебречь, так как магнитное поле у аккумуляторной батареи пренебрежимо мало и должно учитываться только

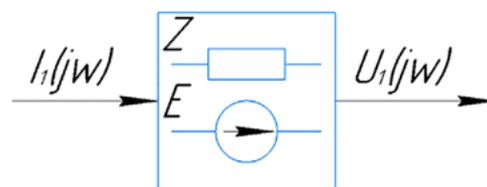


Рис. 3. Двухполюсник ЛИА, представленный как «черный ящик»

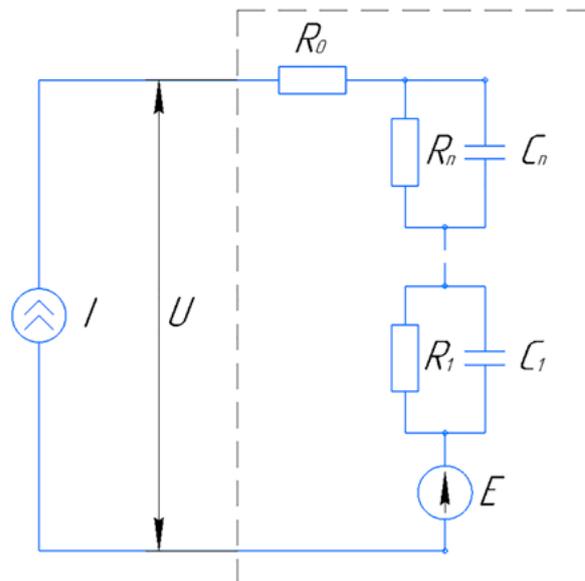


Рис. 4. Г-образная схема замещения ЛИА

при работе аккумуляторной батареи на большой частоте.

На первом этапе синтеза схемы замещения следует установить, реализуема ли физически цепь, заданная своей передаточной функцией $K(p)$ или выходными функциями $Z(p)$ и $Y(p)$ при помощи элементов R и C .

На втором этапе следует реализовать функции цепи методами определения ее структуры и параметров, разработанными в теории синтеза схемы замещения, стремясь к уменьшению и упрощению синтезируемой цепи. При этом, выбирая метод синтеза, необходимо учитывать неоднозначность решения в смысле структуры синтезируемой схемы.



Рис. 5. Исследуемая ячейка ЛИА

ТАБЛИЦА 1. Параметры батареи CATL LFP 92 Amph (паспортные данные)

Емкость	А · ч	92
Рабочее напряжение	В	3.2
Импеданс (1 кГц)	МОм	< 0,4
Заряд (стандартн/макс.)		1,0 С/3,2 С
Разряд (стандартн/макс.)		1,0 С/2,0 С



Рис. 6. Испытательный стенд Chroma 17011 Battery Cell Test

Функции цепи $K(p)$, $Z(p)$ и $Y(p)$ являются функциями комплексного переменного решения или комплексной частоты $p = s + j\omega$, которые определяются распределением их нулей и полюсов.

Заданное $Z(p)$ двухполюсника представляется как (2):

$$\begin{aligned} Z(p) &= R_0 + Z_1(p) + \dots + Z_{n-1}(p) + Z_n(p) = \\ &= R_0 + \frac{1}{C_1} + \dots + \frac{1}{C_{n-1}} + \frac{1}{C_n} = \\ &= R_0 + \frac{1}{p + \frac{1}{R_1 C_1}} + \dots + \frac{1}{p + \frac{1}{R_{n-1} C_{n-1}}} + \frac{1}{p + \frac{1}{R_n C_n}} = \\ &= R_0 + \frac{b_1}{p + d_1} + \dots + \frac{b_{n-1}}{p + d_{n-1}} + \frac{b_n}{p + d_n}. \end{aligned} \quad (2)$$

где b — операторное сопротивление $\frac{1}{C}$;

d — операторное сопротивление $\frac{1}{RC}$.

С течением времени изменяется состояние аккумуляторной батареи, R_1 , C_1 меняет свое значение, представляя этот двухполюсник как некое множество последовательно подключенных цепей R_n, C_n .

$$Z_1(p) = \sum \frac{b_n}{p + d_n}. \quad (3)$$

В своей основе двухполюсник состоит из R, C составляющих, описанных в формуле (4):

$$Z(p) = R_0 + \sum_{n=1}^m \frac{b_n}{p + d_n}, \quad (4)$$

где $b = \frac{1}{C_n}$; $d = \frac{1}{R_n C_n}$.

Для определения параметров схемы замещения аккумуляторной батареи как двухполюсника было проведено исследование литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареи производ-

No.	Step Name	Setting			Cut-Off Condition		Jump			Loop			Cycle		Record	Descripti
		V(V)	I(A)	P(W)	Parameter	Value	Mode	Value	Label	Loop	Count	Label	Cycle	Count		
1	REST				Time(sec)	>= 10	Next								<input checked="" type="checkbox"/>	
2	CC Discharge		92		V(V)	< 2.8	Next								<input checked="" type="checkbox"/>	
3	REST				Time(sec)	>= 60	Next								<input checked="" type="checkbox"/>	
4	Waveform(A)				Time(sec)	>= 360000	Next								<input checked="" type="checkbox"/>	
5	REST				Time(sec)	>= 60	Next								<input checked="" type="checkbox"/>	
6	Waveform(A)				Time(sec)	>= 360000	Next								<input checked="" type="checkbox"/>	
7	REST				Time(sec)	>= 60	Next								<input checked="" type="checkbox"/>	
8	Waveform(A)				Time(sec)	>= 360000	Next								<input checked="" type="checkbox"/>	
9	REST				Time(sec)	>= 60	Next								<input checked="" type="checkbox"/>	
10	Waveform(A)				Time(sec)	>= 360000	Next								<input checked="" type="checkbox"/>	
11	REST				Time(sec)	>= 60	Next								<input checked="" type="checkbox"/>	

Рис. 7. Алгоритм исследования ЛИА, записанный в среде Chroma ПО

ства фирмы CATL емкостью 92 Ач (см. рис. 5) зав. № 03A6W0330374. Данные по батарее приведены в табл. 1, а внешний вид — на рис. 5.

Предварительно для ячейки батареи был произведен полный заряд батареи (согласно ГОСТ Р МЭК 62620—2016 п. 6.2) [10].

Испытание проходило на испытательном стенде Chroma 17011 Battery Cell Test, представленном на рис. 6.

Программное обеспечение Chroma ПО позволяет реализовать алгоритм управления током заряда/разряда ЛИА определенного значения и формы тока, что изображено на рис. 8 и 9. Данные формы заносятся в алгоритм, приведенный на рис. 7, все данные записываются в среде MS Office Excel.

Алгоритм испытания включает в себя ряд экспериментов:

- разряд постоянным током единичным скачком;
- разряд постоянным током с синусоидальной пульсацией;
- разряд постоянным током со скачкообразной пульсацией.

В экспериментах с синусоидальной и скачкообразной пульсацией опыт производился с частотой от 1 до 10 Гц. Для минимизации погрешности и повышения достоверности результатов все эксперименты велись на одном аккумуляторе единым алгоритмом с минутным тайм-аутом

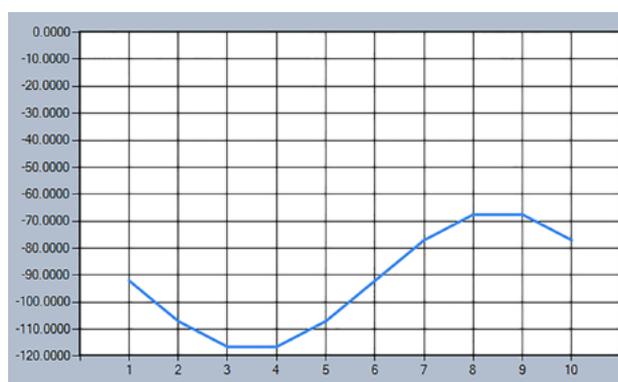


Рис. 8. Синусоидальная форма тока, записанная в алгоритм

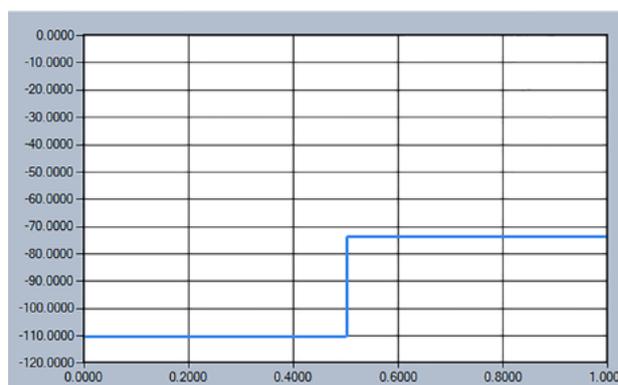


Рис. 9. Скачкообразная форма тока, записанная в алгоритм

между разрядными нагрузками во избежание влияния экспериментов друг на друга.

В эксперименте разряда производился наброс и удержание номинального тока разряда испытуемой ЛИА, равного 92 А, в течение 20 с. Кривые тока и напряжения разряда представлены на рис. 10 и 11.

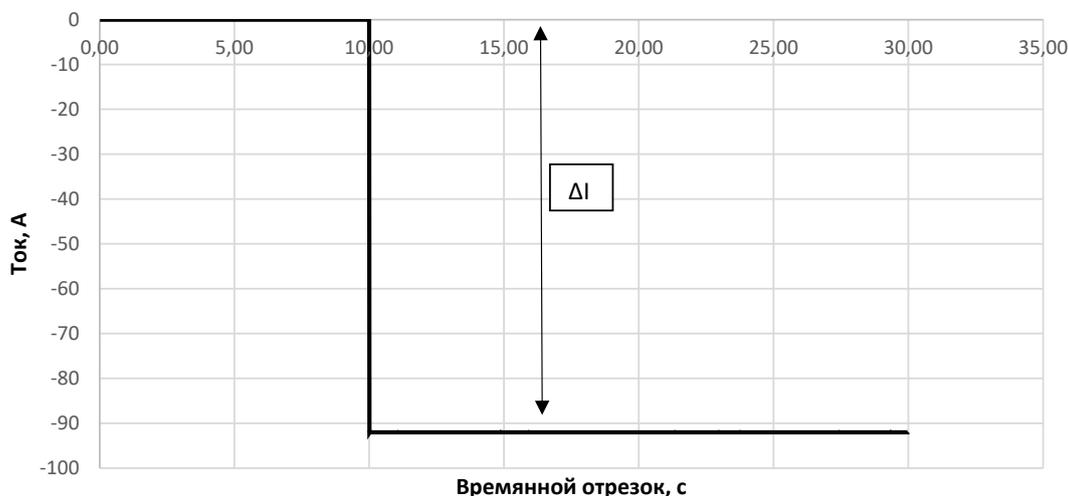


Рис. 10. Форма тока $I(t)$ в эксперименте с набросом номинального разрядного тока

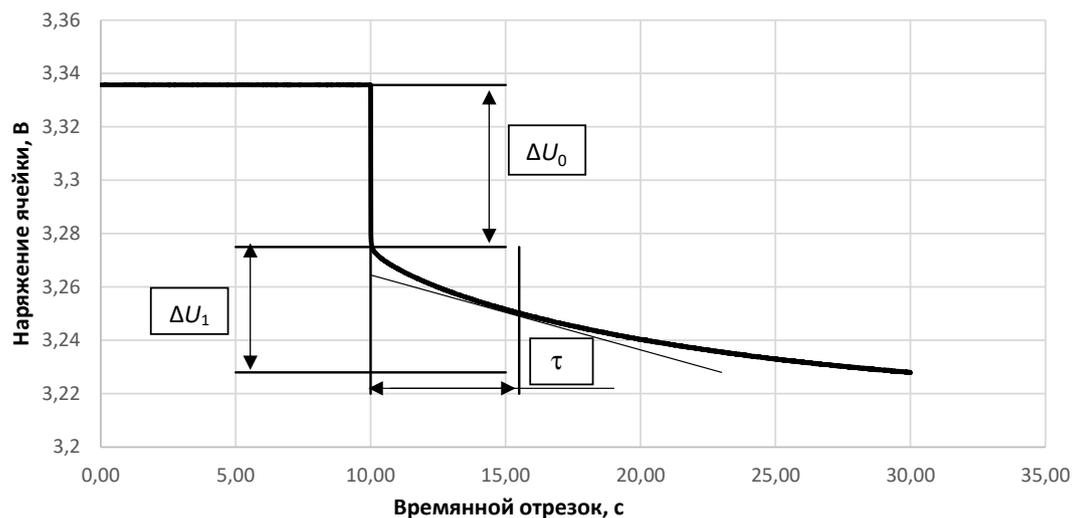


Рис. 11. Форма напряжения $U(t)$ в эксперименте с набросом номинального разрядного тока с поясняющими обозначениями

В результате эксперимента были получены следующие графики $U(t)$ и $I(t)$.

1. Разряд постоянным током

На основании рис. 10 и 11 графики кривых измерения $U(t)$ и $I(t)$ ЛИА можно разделить на следующие части:

– от 0 до 10 секунд — напряжение на зажимах ЛИА без нагрузки, так называемый холостой ход накопителя;

– момент подключения нагрузки ΔU_0 выражается в резком падении напряжения при набросе

номинального разрядного тока в ΔI , что свидетельствует о наличии составляющей активного сопротивления;

– от 10 до 20 — плавное падение напряжения на величину ΔU_1 , кривая падения напряжения свидетельствует о наличии составляющих активного и емкостного сопротивления.

По результатам данного эксперимента вычисляются элементы замещения (5–7), из которых состоит схема замещения двухполюсника аккумуляторной батареи, представленная на рис. 4.

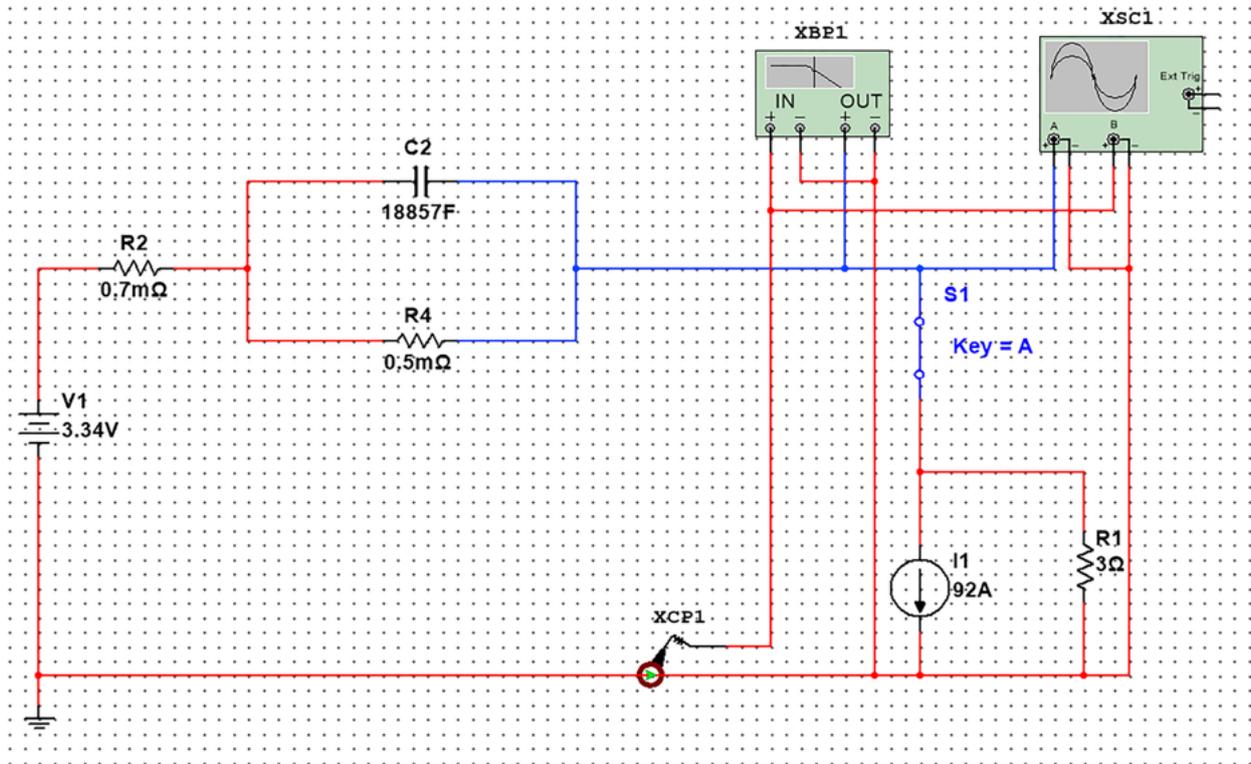


Рис. 12. Схема замещения ЛИА со значениями, полученными в результате эксперимента

$$R_1 = \frac{\Delta U_1}{\Delta I} = \frac{3,275 - 3,23}{92} = 0,5 \text{ мОм.} \quad (6)$$

Частота сопряжения $\omega = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{5,5 \text{ с}}$, где $\tau = 5,5 \text{ с}$.

$$C = \tau \frac{R_0 + R_1}{R_0 \cdot R_1} = 5,5 \cdot \frac{(0,7 + 0,5) \cdot 10^{-3}}{0,7 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 18857 \text{ Ф.} \quad (7)$$

Полученные значения подставляются в модель ЛИА в виде цепи замещения в среде Multisim [11], изображенной на рис. 12, которая включает в себя:

- V1 — ЭДС ЛИА напряжения на разомкнутых клеммах аккумуляторной батареи;
- R_0, R_1, C — Z ЛИА, представленный в модели в виде двух резисторов и одного конденсатора;
- XBP1 — анализатор цепи, регистрирующий АЧХ и ФЧХ исследования;

– XSC1 — осцилограф, регистрирующий параметры тока (посредством датчика тока XCP1) и напряжения ЛИА на протяжении всего исследования;

- R_3 — шунтирующий резистор;
- S1 — ключ.

В результате эксперимента с набросом номинального тока разряда были получены следующие формы $I(t)$ и $U(t)$, представленные на рис. 13 и 14.

2. Разряд синусоидально пульсирующим током

В эксперименте разряда номинальным током с синусоидальной пульсацией производился наброс и удержание номинального тока испытуемой ЛИА разряда в течение 20 с с синусоидальной пульсацией со среднеквадратичным отклонением 20 %. График изображен на рис. 15.

В результате эксперимента с набросом номинального тока разряда с синусоидальной пульса-

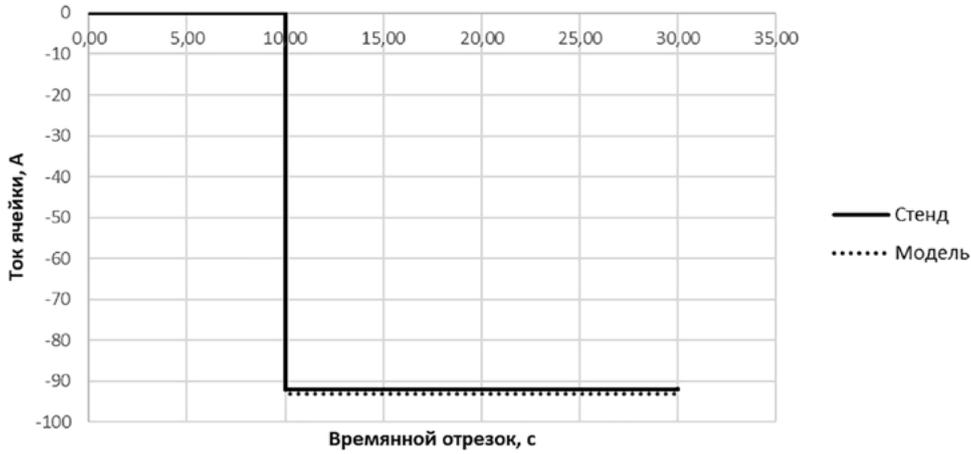


Рис. 13. Форма тока $I(t)$ с набросом номинального разрядного тока по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

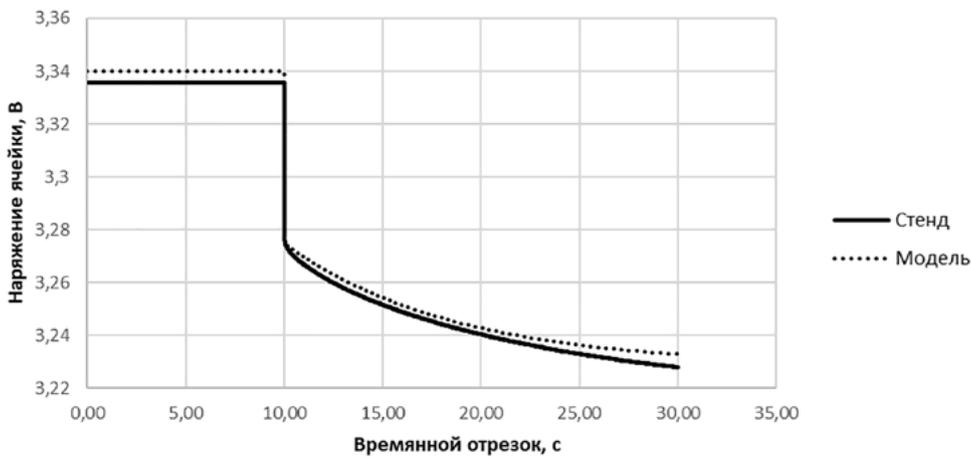


Рис. 14. Форма напряжения $U(t)$ с набросом номинального разрядного тока по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

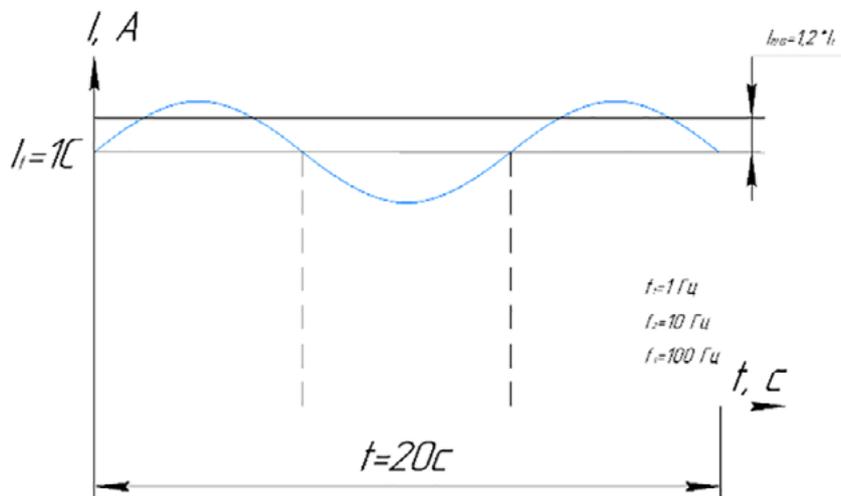


Рис. 15. Разряд ЛИА с синусоидальной пульсацией при разной частоте пульсации

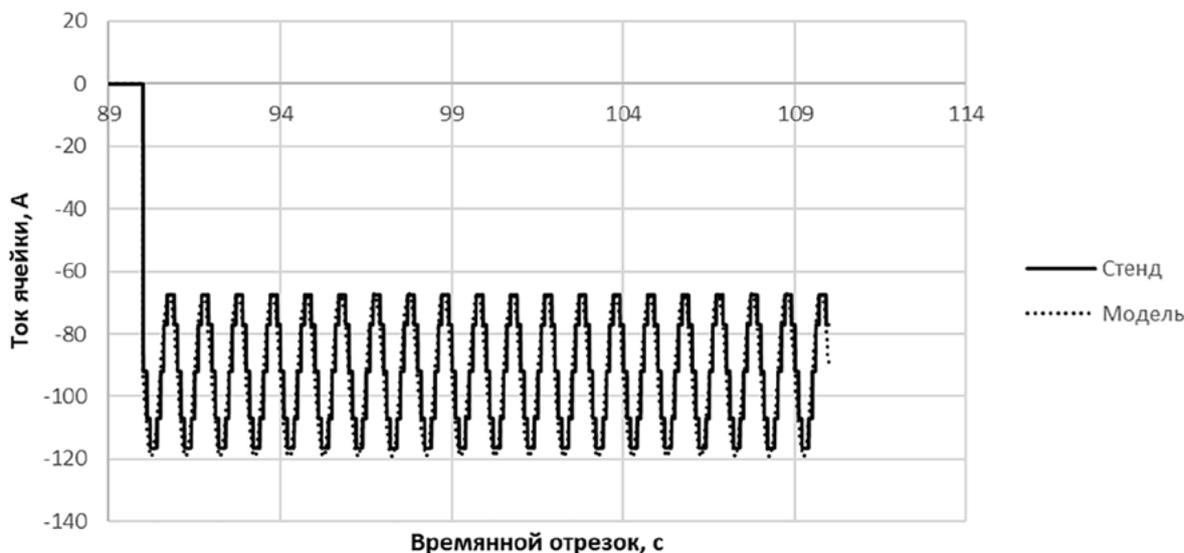


Рис. 16. Форма тока $I(t)$ с набросом номинального разрядного тока с синусоидальной пульсацией 1 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

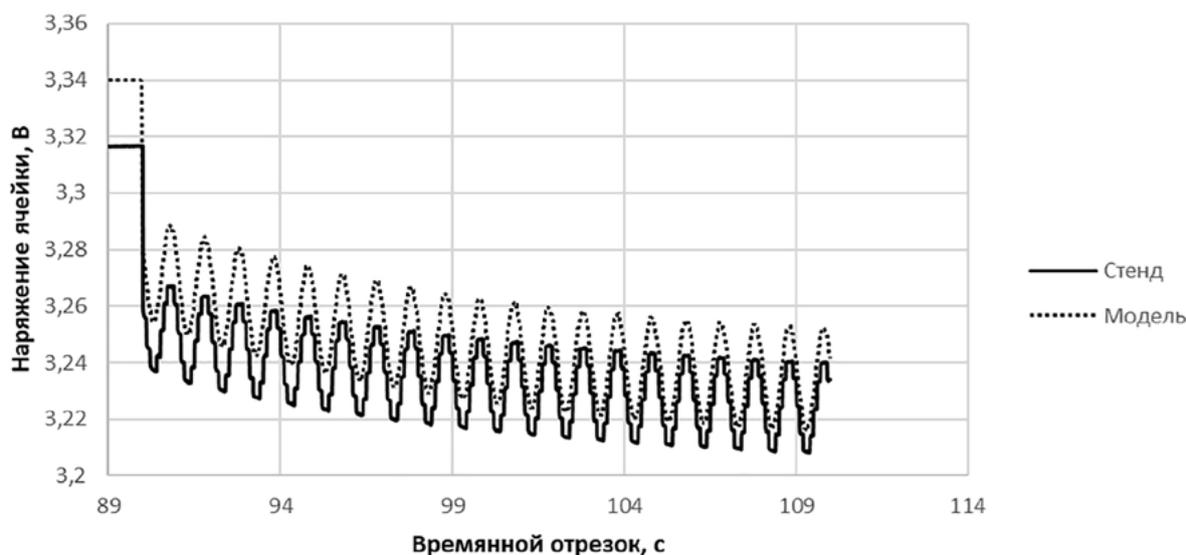


Рис. 17. Форма напряжения $U(t)$ с набросом номинального разрядного тока с синусоидальной пульсацией 1 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

цией были получены формы $I(t)$ и $U(t)$ с частотой пульсации 1 Гц, представленные на рис. 16 и 17, и с частотой 10 Гц — на рис. 18 и 19 соответственно.

3. Разряд скачкообразно пульсирующим током

В эксперименте разряда номинальным током со скачкообразной пульсацией производился

наброс и удержание номинального тока разряда испытуемой ЛИА в течение 20 с со скачкообразной пульсацией со среднеквадратичным отклонением 20 %. График изображен на рис. 20.

В результате эксперимента с набросом номинального тока разряда со скачкообразной пульсацией были получены следующие формы $I(t)$ и $U(t)$ с частотой пульсации 1 Гц, представленные

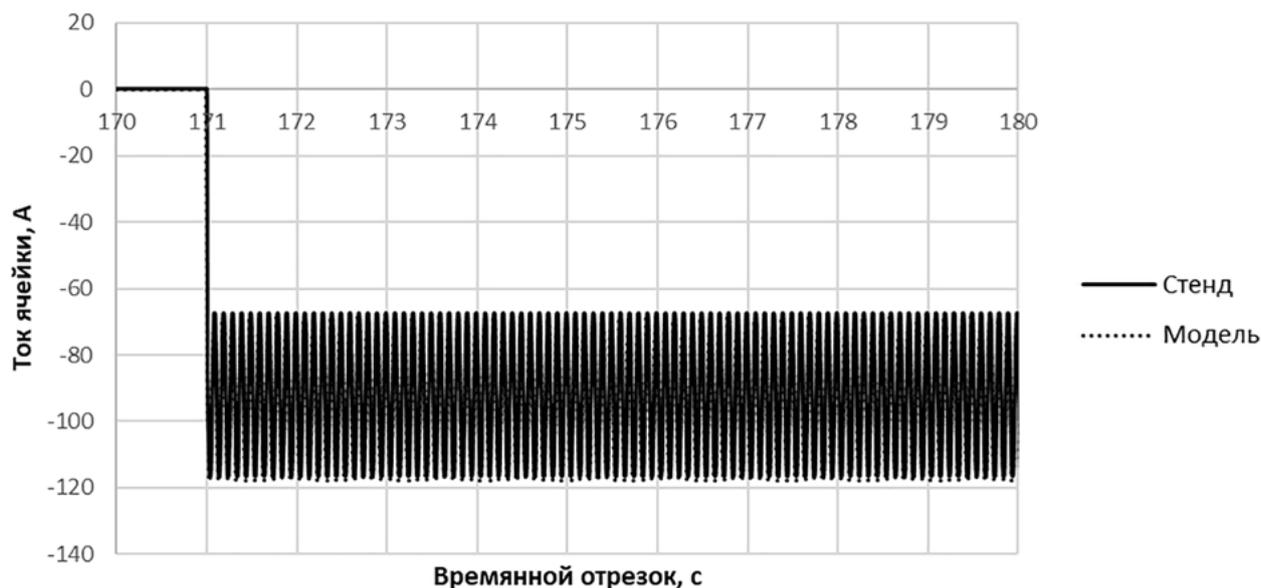


Рис. 18. Форма тока с набросом номинального разрядного тока с синусоидальной пульсацией 10 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

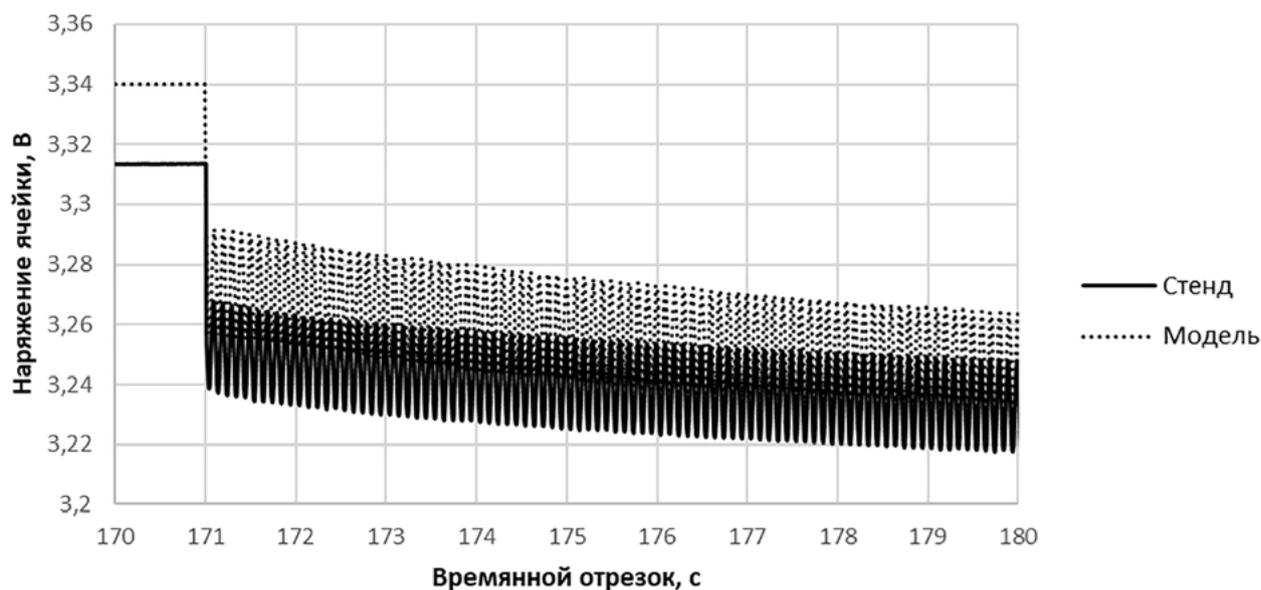


Рис. 19. Форма напряжения $U(t)$ с набросом номинального разрядного тока с синусоидальной пульсацией 1 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

на рис. 21 и 22, и с частотой 10 Гц — на рис. 23 и 24 соответственно.

Графики реального напряжения (значения, полученные на стенде) при синусоидально и скачкообразно пульсирующей нагрузках не совпадают по уровню напряжения, полученному

на модели (отстают примерно на 0,2 В). Причиной этому служат идеальные условия модели, а именно отсутствие восстановления (отдыха ЛИА) между шагами нагрузки (значение напряжения на клеммах реального аккумулятора не успевало восстановиться за 1 минуту). В следу-

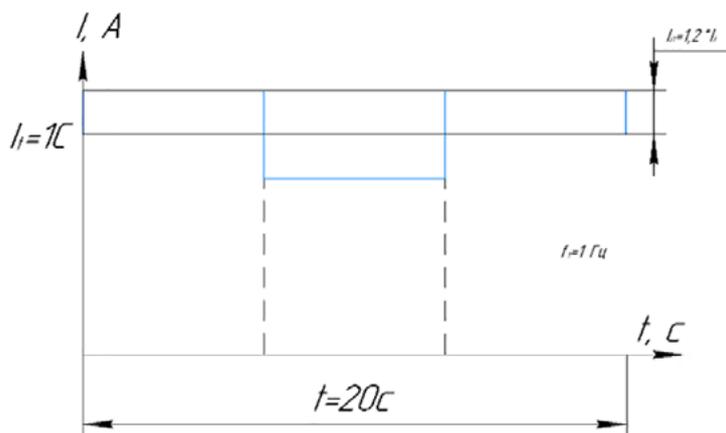


Рис. 20. Разряд ЛИА с скачкообразной пульсацией при разной частоте пульсации

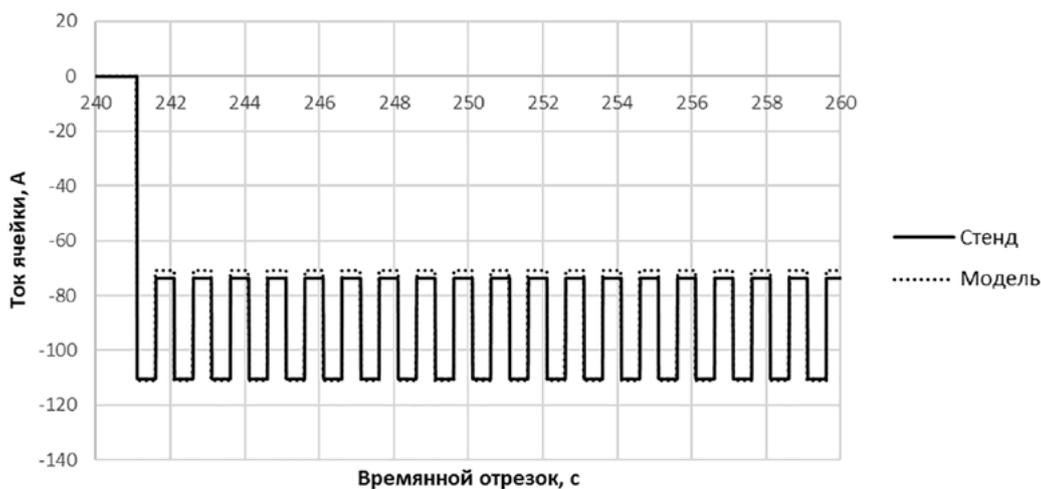


Рис. 21. Форма тока $I(t)$ с набросом номинального разрядного тока со скачкообразной пульсацией 1 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

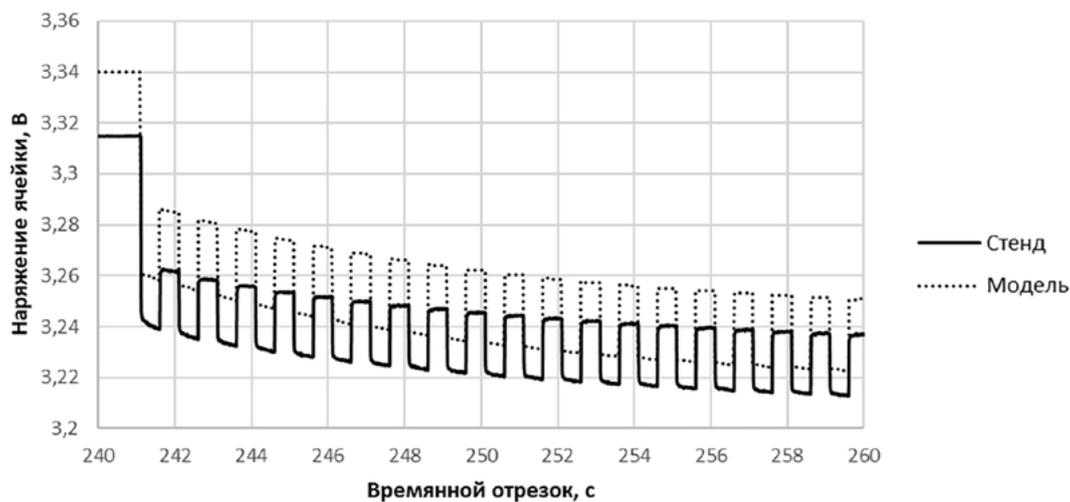


Рис. 22. Форма напряжения $U(t)$ с набросом номинального разрядного тока со скачкообразной пульсацией 1 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

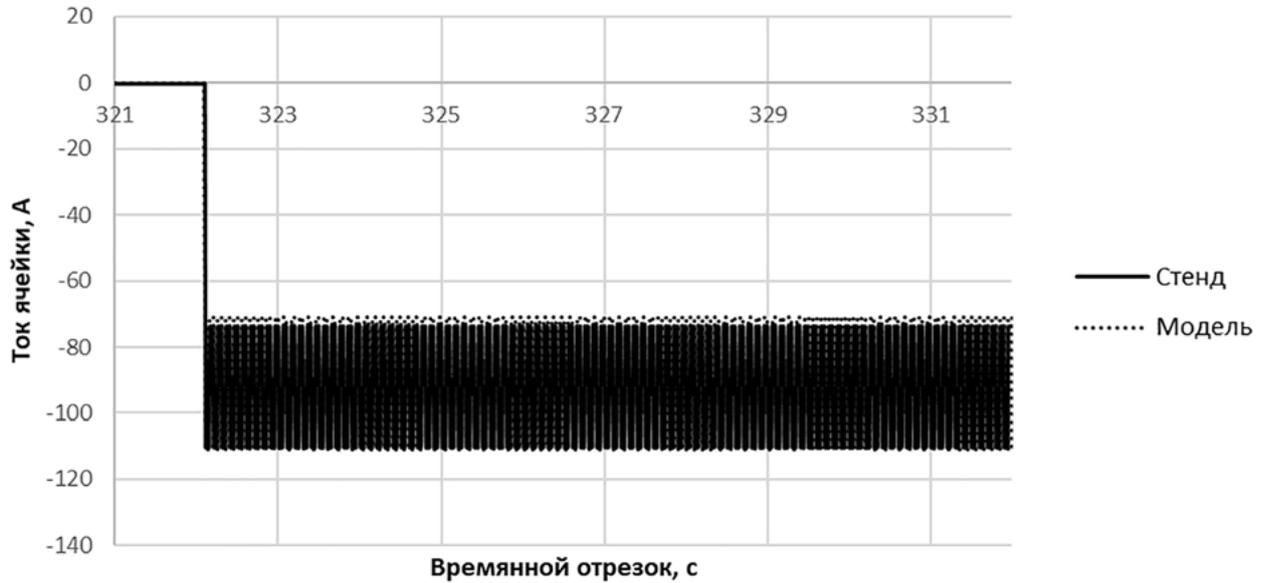


Рис. 23. Форма тока $I(t)$ с набросом номинального разрядного тока со скачкообразной пульсацией 10 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

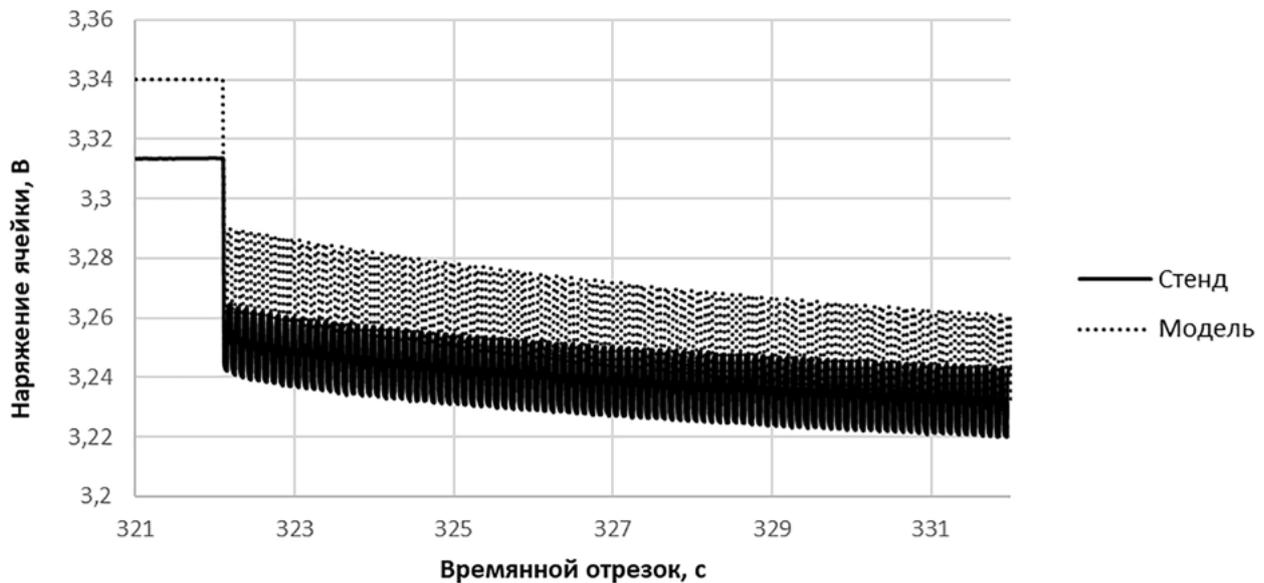


Рис. 24. Форма напряжения $U(t)$ с набросом номинального разрядного тока со скачкообразной пульсацией 10 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

ющих экспериментах время между экспериментами будет увеличено, так чтобы данный фактор не влиял на итоговый результат.

В рамках данного эксперимента были исследованы АЧХ и ФЧХ синтезированной цепи схемы замещения ЛИА, которые представлены на рис. 25 и 26.

Заключение

В статье рассмотрено исследование литий-ионной аккумуляторной батареи, получена модель в виде эквивалентной схемы замещения для элемента ЛИА, а так же приведена методика расчета её составных элементов.

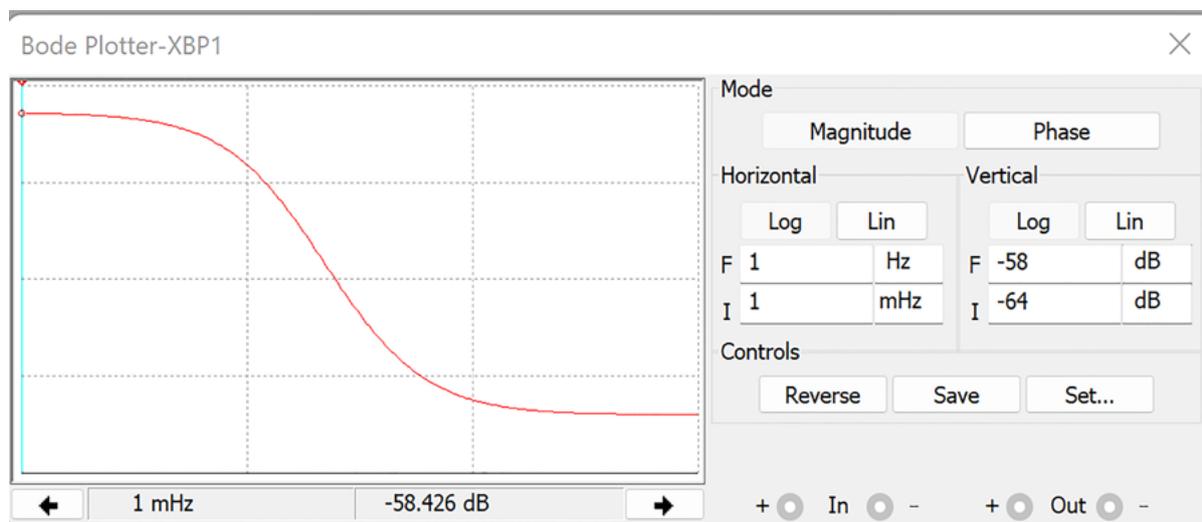


Рис. 25. АЧХ синтезированной цепи схемы замещения ЛИА

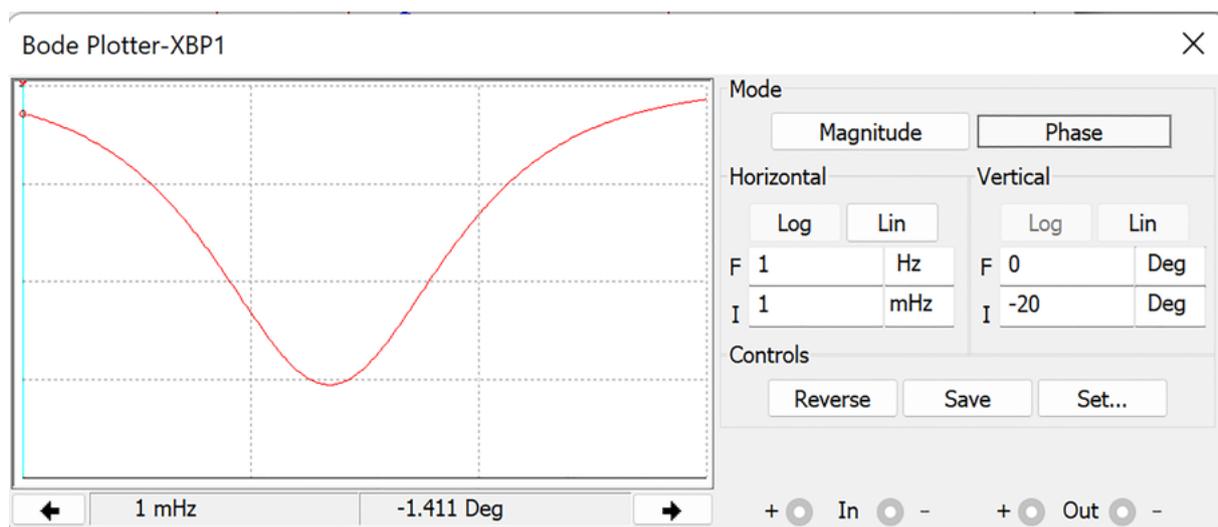


Рис. 26. ФЧХ синтезированной цепи схемы замещения ЛИА

Результаты данного исследования являются основанием для разработки алгоритма диагностирования аккумуляторной батареи при работе с импульсными преобразователями энергии. Используя методы тестовой диагностики ЛИА, в частности, резкий сброс и наброс нагрузки, а также разного рода пульсации, можно исследовать состояния аккумуляторной батареи.

По результатам данного исследования планируется набрать статистические данные по аккумуляторной батарее с разной степенью отработки для формирования связи между характеристиками элемента ЛИА и его схемой замещения.

Библиографический список

1. Хандорин М. М. Оценка остаточной емкости литий-ионного аккумулятора в режиме реального времени / М. М. Хандорин, В. Г. Букреев // Электрохимическая энергетика. — 2014. — Т. 14. — № 2. — С. 78–84.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи 8-е изд., перераб. и доп. / Л. А. Бессонов. — М.: Высшая школа, 1984. — 559 с.
3. Доброго К. В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров / К. В. Доброго, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. — 2021. —

Т. 64. — № 1. — С. 27–39. — DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>.

4. Randles J. E. B. Kinetics of rapid electrode reactions / J. E. B. Randles // *Discussions of the Faraday Society*. — 1947. — Iss. 1. — Pp. 11–19.

5. Плетт Г. Л. Системы контроля аккумуляторной батареи / Г. Л. Плетт. — 2015. — С. 61–63.

6. Гнеденков С. В. Импедансная спектроскопия в исследовании процессов переноса заряда / С. В. Гнеденков, С. Л. Синябрюхов // *Вестник ДВО РАН*. — 2006. — № 5. — С. 6–16.

7. Gregory L. P. Battery Management Systems / L. P. Gregory // Artech House. — 2015. — Vol. I. — 343 p.

8. Борисевич А. В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния / А. В. Борисевич // *Современная техника и технологии*. — 2014. — № 5. — URL: <https://technology.snauka.ru/2014/05/3542>.

9. Зевеке Г. В. Основы теории цепей: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил и др. — М.: Энергия, 1975. — 752 с.

10. ГОСТ Р МЭК 61960—2007. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неокислотные электролиты. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи литиевые для портативного применения. — М.: Стандартинформ, 2008. — 11 с.

11. Шестеркин А. Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10 / А. Н. Шестеркин. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 943 с.

Дата поступления: 09.01.2023

Решение о публикации: 10.02.2023

Контактная информация:

БОРИСОВ Павел Владимирович — аспирант;
nttk@pgups.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич —
д-р техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

КОНСТАНТИНОВ Константин Валерьевич —
канд. техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

САМАРКИНА Ирина Константиновна —
канд. техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

Research of Lithium-Ion Battery Characteristics

P. V. Borisov¹, A. A. Vorobyev¹, K. V. Konstantinov², I. K. Samarkina¹

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²St. Petersburg State Electrotechnical University named after A.I. Ulyanov (Lenin), 2, Instrumentalnaya, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

For citation: Borisov P. V., Vorobyev A. A., Konstantinov K. V., Samarkina I. K. Research of Lithium-Ion Battery Characteristics // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 207–221. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-207-221

Summary

Purpose: To conduct research on obtaining data, that ties lithium-ion battery voltage to perturbing effects of current flow, to synthesize accumulator equivalent circuit, to obtain algorithm for calculating element parameters for accumulator equivalent circuit on experimental data basis with subsequent check of the model adequacy. **Methods:** Prediction of lithium-ion accumulator work by means of voltage shape because of perturbative impacts of flowing sinusoidal intermittent pulsating current. The models of cells in the form of equivalent circuit that play battery state, though not possessing all characteristics of battery physical model. **Results:** Algorithm for lithium-ion battery equivalent circuit synthesis has been considered, physical experiment on finding accumulator equivalent circuit parameters was conducted,

mathematical model on the research results has been compiled and its adequacy has been confirmed. **Practical significance:** The pursued study made it possible to work out algorithm for calculating parameters to form the algorithm of lithium-ion battery functional diagnosis.

Keywords: Lithium-ion battery, functional diagnostics, equivalent circuit, internal resistance of the battery.

References

1. Khandorin M. M., Bukreev V. G. Otsenka ostatochnoy emkosti lityi-ionnogo akkumulyatora v rezhime real'nogo vremeni [Estimation of the residual capacity of a lithium-ion battery in real time]. *Elektrokhimicheskaya energetika* [Electrochemical Energy]. 2014, vol. 14, Iss. 2, pp. 78–84. (In Russian)
2. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi 8-e izd., pererab. i dop.* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical Circuits 8th ed. revised and extended]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1984, 559 p. (In Russian)
3. Dobrego K. V., Bladyko Yu. V. Modelirovanie akkumulyatornykh batarey i ikh sborok s uchetom degradatsii parametrov [Modeling of storage batteries and their assemblies, taking into account the degradation of parameters]. *Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy i energ. ob"edineniy SNG* [Energy. Izv. higher textbook institutions and energy. associations of the CIS]. 2021, vol. 64, Iss. 1, pp. 27–39. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>. (In Russian)
4. Randles J. E. B. Kinetics of rapid electrode reactions. *Discussions of the Faraday Society*. 1947, Iss. 1, pp. 11–19.
5. Plett G. L. *Sistemy kontrolya akkumulyatornoy batarei* [Battery monitoring systems]. 2015, pp. 61–63. (In Russian)
6. Gnedenkov S. V., Sinebryukhov S. L. Impedansnaya spektroskopiya v issledovanii protsessov perenosa zaryada [Impedance spectroscopy in the study of charge transfer processes]. *Vestnik DVO RAN* [Vestnik FEB RAS]. 2006, Iss. 5, pp. 6–16. (In Russian)
7. Gregory L. P. *Battery Management Systems*. Artech House. 2015, vol. I, 343 p.
8. Borisevich A. V. Modelirovanie lityi-ionnykh akkumulyatorov dlya sistem upravleniya batareyami: obzor tekushchego sostoyaniya [Simulation of lithium-ion batteries for battery management systems: a review of the current state]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii* [Modern Technique and Technologies]. 2014, Iss. 5. Available at: <https://technology.snauka.ru/2014/05/3542>. (In Russian)
9. Zeveke G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V. et al. *Osnovy teorii tsepey: uchebnik dlya vuzov. 4-e izd., pererab.* [Fundamentals of Circuit Theory. Textbook for Universities. 4th revised edition]. Moscow: Energia Publ., 1975. 752 p. (In Russian)
10. *GOST R IEC 61960—2007. Akkumulyatory i akkumulyatornye batarei, sodержashchie shchelochnoy i drugie nekislotnye elektrolity. Akkumulyatory i akkumulyatornye batarei lityevye dlya portativnogo primeneniya* [GOST R IEC 61960—2007. Batteries and rechargeable batteries containing alkaline and other non-acidic electrolytes. Lithium batteries and rechargeable batteries for portable applications]. Moscow: Standartinform Publ., 2008. 11 p. (In Russian)
11. Shesterkin A. N. *Sistema modelirovaniya i issledovaniya radioelektronnykh ustroystv Multisim 10* [System for modeling and research of radio electronic devices Multisim 10]. Moscow: DMK Press Publ., 2015. 943 p. (In Russian)

Received: January 09, 2023

Accepted: February 10, 2023

Author's information:

Pavel V. BORISOV — Postgraduate Student; nttk@pgups.ru
Aleksandr A. VOROBYEV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru
Konstantin V. KONSTANTINOV — PhD in Technical Sciences, Associate Professor; nttk@pgups.ru
Irina K. SAMARKINA — PhD in Technical Sciences, Associate Professor; nttk@pgups.ru