

УДК: 629.3.017:629.3.018+629.3.027.3

<https://doi.org/10.17816/2074-0530-104574>

Оригинальное исследование

Разработка математической модели литий-ионной аккумуляторной батареи и ее сравнение с существующими аналогами

Барсегян К.Р.,
Перепелица М.А.,
д.т.н. Онищенко Д.О.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Обоснование. Возросшее со стороны мирового сообщества внимание к проблемам изменения климата сдвигает акценты лидеров автоиндустрии на разработку и массовый выпуск автомобилей, оснащенных электрической силовой установкой. В свою очередь аккумулятор, как наиболее важная и ответственная часть любого электромобиля, нуждается в детальной проработке уже на стадии создания цифрового двойника изделия. Точное предсказание рабочих характеристик будущего аккумулятора и их отслеживание в реальном времени возможно только при наличии качественной математической модели батареи.

Цель работы – исследовать существующие имитационные модели работы литий-ионного аккумулятора, сравнить их результаты с экспериментальными данными и повысить точность благодаря использованию разработанной динамической модели, учитывающей процессы гистерезиса.

Материалы и методы. Моделирование выполнено на основе программы, написанной в *Matlab*, и в среде *Simcenter Amesim*, где при помощи компонентов библиотеки *electric storage* собран виртуальный стенд работы литий-ионных ячеек.

Результаты. Подготовлена модель работы ячейки в *Amesim* и изложены основные принципы электротермического моделирования аккумуляторного элемента с учетом эффекта гистерезиса. Проведена симуляция моделей в *Amesim* и *Matlab* по сценарию нагружения ячейки от реального электродвигателя в условиях движения по городу. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов с экспериментальными данными.

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенной математической модели для разработки систем управления аккумуляторными батареями и оптимизации работы силовой установки электромобилей за счет лучшего качества используемых моделей.

Ключевые слова: литий-ионные батареи; математическая модель батарей; электромобили; испытательный стенд; гистерезис; валидация

Для цитирования: Барсегян К.Р., Перепелица М.А., Онищенко Д.О. Разработка математической модели литий-ионной аккумуляторной батареи и ее сравнение с существующими аналогами // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2022. № 1(16). DOI: 10.17816/2074-0530-104574

Введение

В автомобильной промышленности в настоящее время наблюдается существенное изменение структуры рынка в связи с изменением стратегий европейских регуляторов, стремящихся сократить выбросы парниковых газов на континенте. Уже к 2035 году по решению Еврокомиссии на территории Евросоюза будут запрещены к выпуску автомобили, работающие на традиционных видах ископаемого топлива. Таким образом, из всех возможных альтернатив электромобили видятся как наиболее конкурентная альтернатива для выхода из сложившейся ситуации [1–4].

Использование электромобилей способно полностью устранить парниковый эффект, их энергоэффективность превосходит аналоги на ДВС, а относительно простое устройство трансмиссии позволяет быстрее налаживать их массовое производство.

Однако повсеместное внедрение электромобилей осложнено проблемами, связанными с аккумулятором. Производителям необходимо решать задачи прогнозирования времени автономности автомобиля, решать проблемы с зарядкой, изучать влияние условий эксплуатации на срок службы батарей, снижать их стоимость [5, 6].

Характеристики реального автомобиля могут быть серьезно улучшены за счет соответствующей электроники и программного обеспечения. По этой причине становится актуальной задача создания цифровой модели всего электромобиля и ее дальнейшая валидация.

Цель исследования

Основная цель данной статьи – исследовать существующие имитационные модели работы аккумулятора, сравнить их результаты с экспериментальными данными и повысить точность благодаря использованию динамической модели, учитывающей процессы гистерезиса.

Электротермическое моделирование ячейки аккумуляторной батареи в *Amesim*

В качестве базовой модели для дальнейшего сравнения используется расширенная динамическая модель эквивалентной схемы (рис. 1), представленная в библиотеке *Electric storage Simcenter Amesim*.

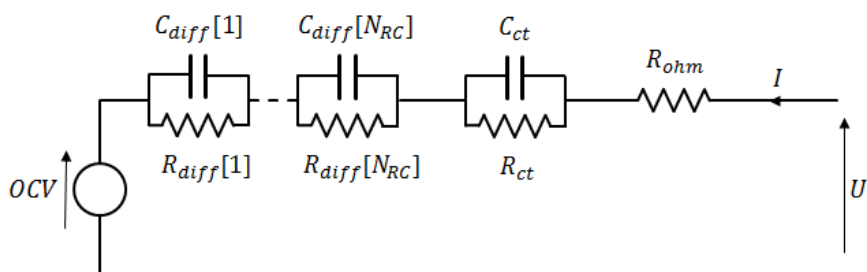


Рис. 1. Модель динамической эквивалентной схемы аккумуляторного элемента.

Данная модель включает дополнительные RC -цепи для правильного определения динамических характеристик батареи, связанных с явлениями диффузии (C_{diff} , R_{diff}) и переноса заряда (C_{ct} , R_{ct}). Эта модель может использоваться для моделирования динамического поведения и тепловых переходных процессов в батарее. Данное представление может быть очень простым, учитывающим только две основные характеристики.

- Напряжение холостого хода (OCV), которое определяет напряжение батареи в состоянии покоя.
- Омическое сопротивление R , определяющее мгновенное падение напряжения от тока заряда или разряда.

Также оно позволяет активировать моделирование различных сложных явлений, таких как:

- КПД Фарадея, который учитывает потери, возникающие во время зарядки. Данный коэффициент описывает эффективность, с которой происходит передача зарядов при электрохимической реакции;
- моделирование гистерезиса, которое учитывает изменение напряжения холостого хода,

связанное с историей заряда и разряда;

- коэффициент энтропии, который моделирует изменение напряжения холостого хода из-за изменения температуры и обратимого теплового потока, связанного с этим явлением;
- диффузию и передачу заряда, которые моделируются переходным процессом падения напряжения с использованием RC-цепей;
- температурный разгон, который представляет собой экзотермические реакции в ячейке во время нагрева;
- старение, которое оценивает календарное и циклическое старение по емкости и сопротивлению батареи.

Основные уравнения, описывающие модель аккумуляторной батареи выглядят следующим образом.

Уровень заряда:

$$\frac{dSOC}{dt} = 100 \frac{I}{Q} \eta_{farad},$$

где I – ток, А; Q – емкость батареи, Ач; η_{farad} – кулоновская эффективность.

Для каждой цепи C_{diff} , R_{diff} с номером i падение диффузионного напряжения $\Delta U_{diff}(i)$:

$$\frac{d[\Delta U_{diff}(i)]}{dt} = \frac{-I - \frac{\Delta U_{diff}(i)}{R_{diff}(i)}}{C_{diff}(i)}.$$

Для модели с переносом заряда, падение напряжения:

$$\frac{d(\Delta U_{ct})}{dt} = \frac{-I - \frac{\Delta U_{ct}}{R_{ct}}}{C_{ct}}.$$

Падение напряжения на омическом сопротивлении:

$$\Delta U_{ohm} = -IR_{ohm}.$$

Большинство параметров, необходимых для расчета, можно задать в виде таблиц, выражений или фиксированных значений.

В данном исследовании моделируется процесс работы литий-никель-марганец-кобальт-оксидного аккумулятора без учета эффектов гистерезиса. Основные характеристики аккумулятора представлены в таблице.

Параметры	Единица измерения	Значение
Масса	кг	0.047
Минимальное напряжение	В	2.5
Максимальное напряжение	В	4.2
Продолжительный ток разрядки	А	20
Продолжительный ток зарядки	А	4
Мгновенный ток разрядки	А	30
Мгновенный ток зарядки	А	4
Минимальная температура	°C	-20
Максимальная температура	°C	60

Таблица. Геометрические, термические и энергетические параметры ячейки.

На основании экспериментальных данных составлена модель виртуального испытательного стенда (рис. 2). На данном стенде батарея получает нагрузку в виде управляющего током сигнала, который соответствует значениям, полученным во время реального эксперимента. Результаты, полученные на виртуальной тестовой модели, сравниваются с результатами эксперимента.

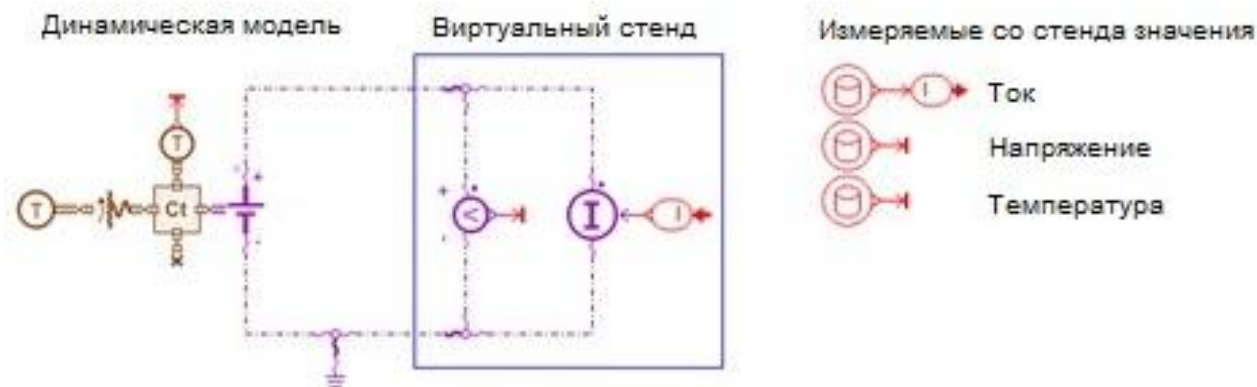


Рис. 2. Виртуальный испытательный стенд.

Электротермическое моделирование аккумуляторного элемента с учетом эффекта гистерезиса в среде *Matlab*

Для наблюдения эффекта гистерезиса необходимо подать на ячейку постоянный ток, после чего замерить напряжение на клеммах. Далее кратковременно нагрузить ячейку током другого направления. Если это был достаточно короткий импульс, то уровень заряда изменился ничтожно мало, то есть можно считать, что *SOC* остался таким же, как и до импульса. Если вновь измерить напряжение на клеммах аккумулятора, то оно будет значительно отличаться от предыдущего значения. Это и есть эффект гистерезиса: напряжение на ячейке зависит от последнего значения силы и направления тока через ячейку [7-9].

На рис. 3 представлен график зависимости *SOC* от напряжения на клеммах ячейки в опыте, порядок проведения которого описан ниже:

- ячейка заряжена на 100 % *SOC*;
- ячейку разряжают очень маленьким током (порядка $C/30$) до 0 % *SOC*;
- ячейку заряжают очень маленьким током (порядка $C/30$) до 95 % *SOC*;
- ячейку разряжают очень маленьким током (порядка $C/30$) до 5 % *SOC*;
- ячейку заряжают очень маленьким током (порядка $C/30$) до 90 % *SOC* и т.д.

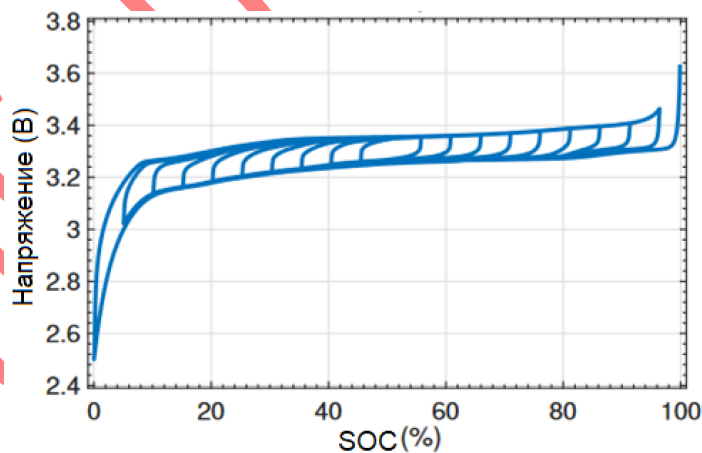


Рис. 3. Гистерезис литий-ионной ячейки.

Так как ток разрядки и зарядки очень мал, можно пренебречь диффузией и считать, что напряжение на клеммах отличается от *OCV* только на величину гистерезиса. Для лучшего понимания выделим из графика гистерезис. Результат показан на рис. 4. Можно заметить, что при разрядке гистерезис отрицательный, а при зарядке положительный. Также видно, что в моменты переключения между зарядкой и разрядкой гистерезис быстро начинает убывать или расти к своему основному значению в данном режиме, и чем текущее значение ближе к основному, тем медленнее оно меняется.

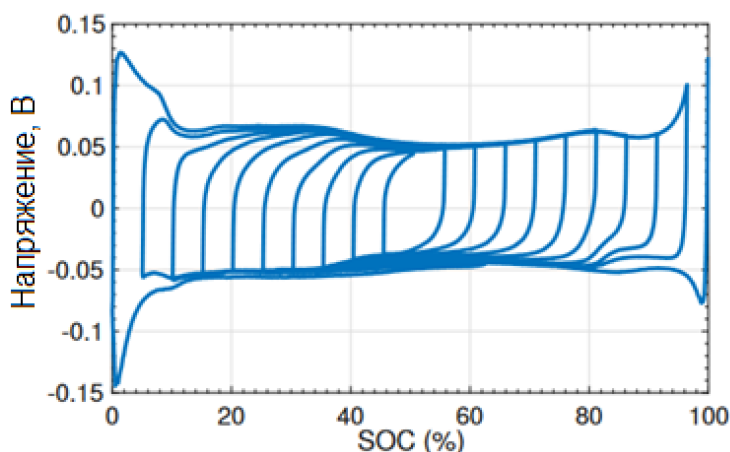


Рис. 4. Гистерезис литий-ионной ячейки, выделенный из общего графика.

Это явление можно примерно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dh(z,t)}{dz} = \gamma \operatorname{sgn}(z) (M(z, z) - h(z,t)),$$

где h – гистерезис, λ – коэффициент скорости роста и убывания, M – коэффициент пропорциональности между скоростью изменения гистерезиса и расстоянием от основного значения [10].

Умножим обе части на $\frac{dz}{dt}$:

$$\frac{dh(z,t)}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \gamma \operatorname{sgn}(z) (M(z, z) - h(z,t)) \cdot \frac{dz}{dt}.$$

Вспомним, что $\dot{z}(t) = \frac{-i(t)}{Q} \eta(t)$, и преобразуем выражение:

$$\dot{h}(t) = - \left| \frac{\eta(t)i(t)\gamma}{Q} \right| h(t) + \left| \frac{\eta(t)i(t)\gamma}{Q} \right| M(z, z).$$

С помощью метода преобразования дифференциального уравнения в дискретное получим:

$$h[k+1] = \exp\left(-\left|\frac{\eta(t)i(t)\gamma}{Q}\right|\right) h[k] + \left(1 - \exp\left(-\left|\frac{\eta(t)i(t)\gamma}{Q}\right|\right)\right) M \operatorname{sgn}(i[k]).$$

Далее для удобства поделим обе части на M , а выражения $h[k]/M$ и $h[k+1]/M$ заменим на $h[k]$ и $h[k+1]$, как было до этого. Теперь h лежит в пределах от 0 до 1. Полное значение гистерезиса обозначим как:

$$v_h[k] = M \cdot h[k],$$

где h можно найти по формуле:

$$h[k+1] = \exp\left(-\left|\frac{\eta(t)i(t)\gamma}{Q}\right|\right) h[k] + \left(1 - \exp\left(-\left|\frac{\eta(t)i(t)\gamma}{Q}\right|\right)\right) \operatorname{sgn}(i[k]).$$

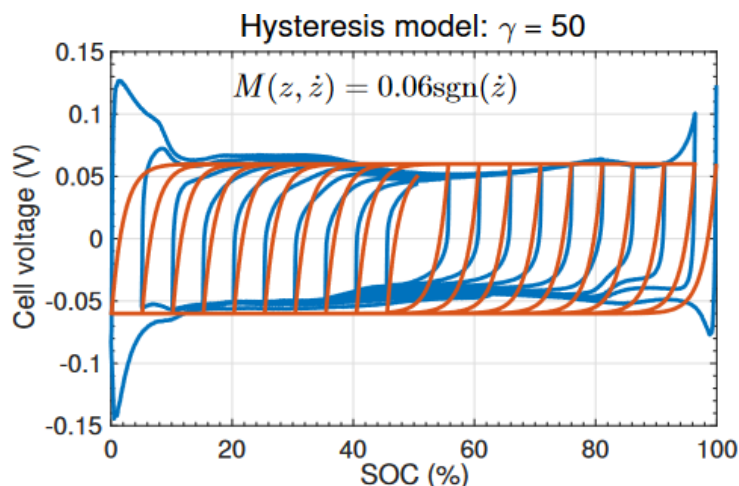


Рис. 5. Сравнение гистерезиса реальной ячейки и созданной модели.

На рис. 5 представлен график гистерезиса реальной ячейки (синий) и описанной модели (оранжевый). Значения меняются плавно во всем диапазоне и во все моменты времени. Поэтому данный гистерезис будем называть динамическим. Видно, что у математической модели вертикальные линии имеют наклон, в отличие от тех же линий на графике реальной ячейки. Очевидно, что необходимо добавить некоторую константу, на которую значение гистерезиса будет меняться сразу после изменения режима работы (зарядки и разрядки). Это даст более точное приближение к реальной ячейке [11].

Данную константу назовем мгновенным гистерезисом. Определим его следующим образом:

$$h_i[k] = M_0 s[k],$$

где $s[k]$ – знак тока (зарядка или разрядка) или предыдущее значение в случае отсутствия тока:

$$s[k] = \begin{cases} \text{sgn}(i[k]), & |i[k]| > 0 \\ s[k-1], & i[k] = 0 \end{cases}$$

Таким образом, суммарный гистерезис равен:

$$v[k] = M \cdot h[k] + M_0 s[k].$$

График этой зависимости вместе с графиком реальной ячейки представлен на рис. 6.

Данное математическое описание явления гистерезиса можно добавить к общей математической эквивалентной модели, представленной на рис. 7.

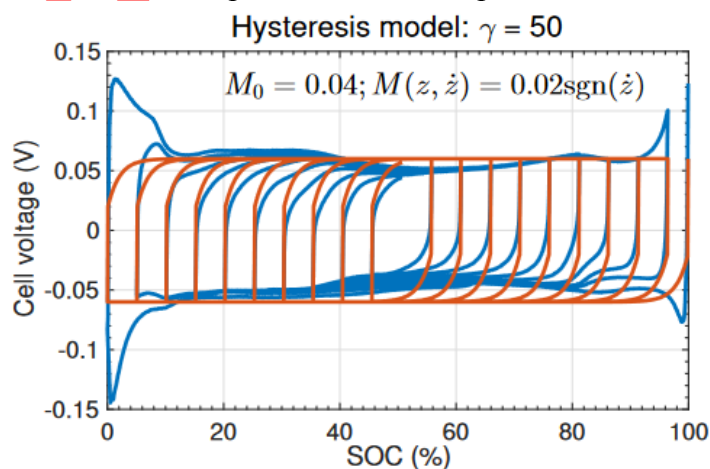


Рис. 6. Улучшенная модель гистерезиса.

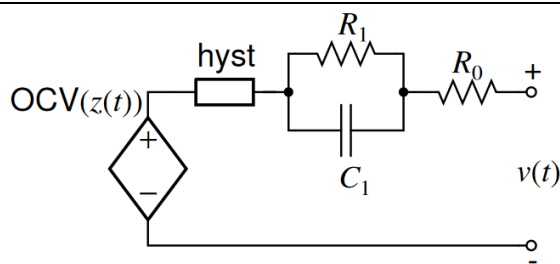


Рис. 7. Итоговая эквивалентная модель литий-ионной ячейки.

Оценка точности полученных моделей

В качестве нагрузки использован профиль, полученный в реальных условиях движения автомобиля в городском трафике (рис. 8).

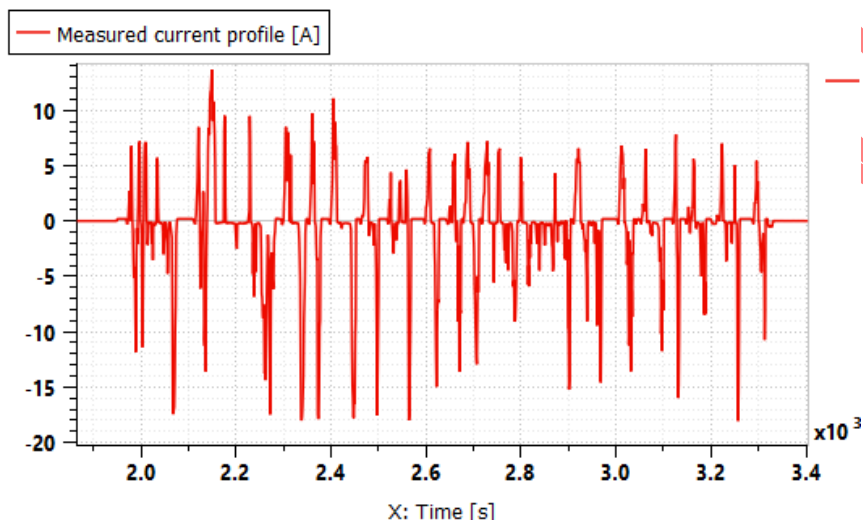


Рис. 8. Профиль нагружения аккумуляторной ячейки.

Построим графики напряжения на клеммах аккумулятора. Первый график (красный) получен в результате тестирования реальной ячейки, второй (синий) построен на основе модели, учитывающей гистерезис, и, наконец, третий (оранжевый) является результатом моделирования эквивалентной динамической схемы в *Amesim*, без учета эффекта гистерезиса. На рис. 9 изображены графики части десятичасового теста, а на рис. 10 -- сорока минут из середины теста, для лучшего понимания.

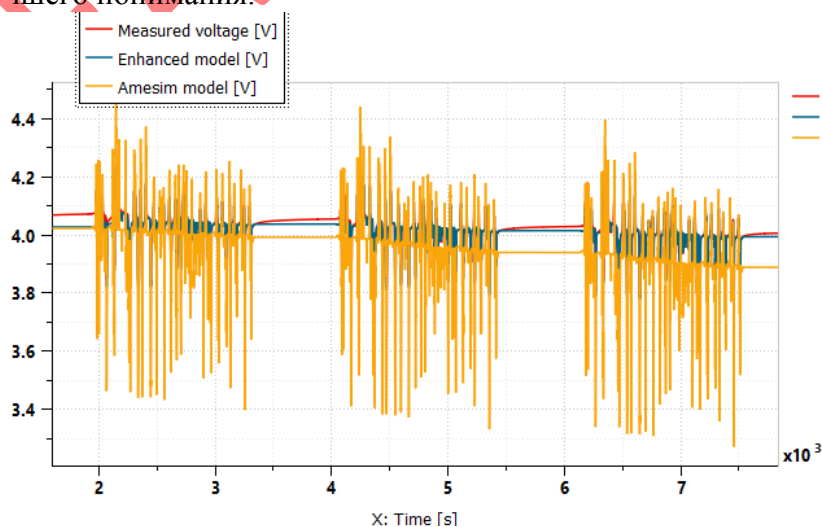


Рис. 9. Сравнение эквивалентной модели и реальной литий-ионной ячейки.

По этим данным была посчитана среднеквадратичная ошибка между реальным напряжением и напряжением, полученным при симуляции для обеих моделей. В результате модель, учитывающая эффект гистерезиса показывает лучшую точность: 5.3 мВ по сравнению с

19.2 мВ для модели в *Amesim*.

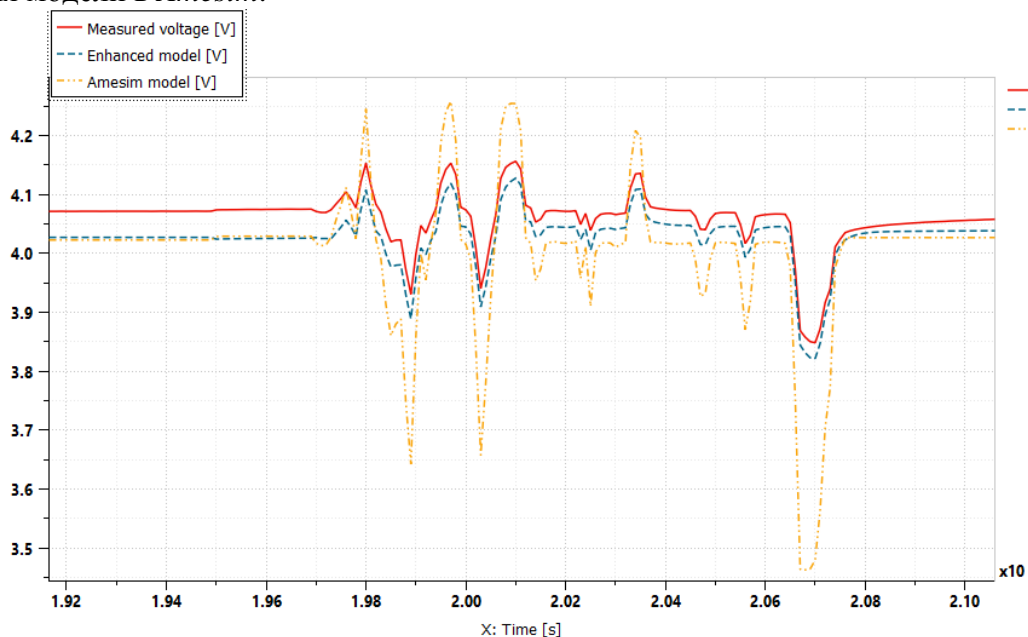


Рис. 10. Сравнение эквивалентной модели и реальной литий-ионной ячейки (детальный вид).

Выводы и заключение

В настоящее время математическая эквивалентная модель литий-ионных ячеек создается на основании тонких химических особенностей конкретного аккумулятора и требует от месяца до полугода исследований, тестов и вычислений. Описанный в данной работе способ создания эквивалентной модели в отличие от ныне существующих позволяет получать хорошее приближение к реальному литий-ионному аккумулятору за кратчайшие сроки, так как он не основывается на химии литий-ионных ячеек и подходит для любого типа аккумуляторов. При этом точность итоговой математической модели, посчитанной данным способом, оказывается выше, чем точность модели, использующей сложные химические уравнения. Это позволяет точнее рассчитывать характеристики аккумуляторных батарей и оптимизировать время автономной работы автомобиля на трассе.

Литература

1. International Energy Agency (IEA), Technology Roadmap: Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles, (EV/PHEV), IEA, 2011.
2. M. Yilmaz and P. T. Krein, Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles, IEEE Transactions on Power Electronics, 28(5):2151–2169, 2012.
3. B. Frieske, M. Kloetzke, and F. Mauser, Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles, Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), Barcelona, pages 1–12, 2013.
4. IPCC, Climate change 2014 synthesis report, IPCC, 2014.
5. F. Zhong, O. Martinez, R. Gormus, and P. Kulkarni, The reign of EV's? An economic analysis from consumer's perspective, IEEE Electrification Magazine, 2(2):61–71, 2014.
6. Hoke, A. Brissette, K. Smith, A. Pratt, and D. Maksimovic. Accounting for Lithium-Ion Battery Degradation in Electric Vehicle Charging Optimization. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2(3):691–700, 2014.
7. Курс университета Колорадо. Система контроля аккумуляторной батареи // Coursera. 2019.
8. Дэвид А. Система контроля аккумуляторной батареи для больших литий-ионных аккумуляторных сборок // 2010. №. 1. С. 50–55.
9. Грегори Л. Плетт. Системы контроля аккумуляторной батареи. 2015. №. 1. С. 61–63.
10. Филипп Вайкер. Системный подход к управлению литий-ионными аккумуляторами. 2014. №. 1. С. 32–35.
11. Бруно Скросати, Юрген Гарче, Вернер Тильметц. Достижения в области аккумуляторных технологий для электромобилей. 2015. №. 1. С. 116–118.

Сведения об авторах

Барсегян Карен Робертович
инженер электрик/электроник
ЛАНИТ, Департамент цифровой трансформации машиностроения
E-mail: karen.barsegyan-2001@bk.ru

*Перепелица Максим Александрович
инженер-конструктор
ЛАНИТ, Департамент цифровой трансформации машиностроения,
*E-mail: m_perepelica@baumanracing.ru

Онищенко Дмитрий Олегович
д.т.н.
профессор кафедры “Энергомашиностроение”,
директор Научно-образовательного центра «Формула-студент» Московского Государ-
ственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва
E-mail: doctor@baumanracing.ru

AHEAD OF PRINT