



Ссылка на статью:

// Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. 2023, № 1, с. 171–179.

Поступила: 17.05.2023

Окончательный вариант: 20.05.2023

© УлГУ

УДК 004.94

## Компьютерное моделирование динамики состояния заряда (SOC) электрических аккумуляторов

Чернов М. Б.<sup>\*</sup>, Голубков А. В.

[\\*chernovmb2002@gmail.com](mailto:chernovmb2002@gmail.com)

УлГПУ им. И.Н. Ульянова, Ульяновск, Россия

---

В статье рассматривается задача компьютерного моделирования динамики состояния заряда SOC (State of Charge) литий-ионных аккумуляторных батарей. Для решения поставленных задач используется дискретная модель, основанная на применении схемы замещения. Выполнена компьютерная реализация модели на языке Python, в ходе которой получены графики зависимости параметра SOC и напряжения от времени при использовании постоянного и пульсирующего тока разряда, а также профиля тока WLTC (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure).

**Ключевые слова:** состояние заряда аккумулятора, SOC, модель аккумуляторной батареи, схема замещения, WLTC

---

### Введение

В последние десятилетия в связи с бурным развитием альтернативной энергетики огромную роль начинают играть накопители энергии, позволяющие накапливать, сохранять и использовать полученную энергию. Одним из важнейших типов накопителей энергии, применяемых в промышленности, на транспорте и в быту, являются электрические аккумуляторы и аккумуляторные батареи. Ключевыми вопросами их эксплуатации являются эффективность и безопасность использования, требующие постоянного мониторинга внутреннего состояния. Наиболее важными характеристиками состояния являются параметры SOC (State of Charge —

уровень заряда) и SOH (State of Health — уровень здоровья), которые характеризуют соответственно доступную емкость и уровень деградации электрических аккумуляторов. Оценка (идентификация) данных параметров является сложной задачей из-за значительных изменений характеристик аккумуляторов в течение срока их службы в силу старения и отчетливого нелинейного поведения. Поиски решений указанной задачи привели к появлению различных методов оценки состояния электрических аккумуляторов и аккумуляторных батарей, среди которых можно выделить методы, основанные на использовании алгоритмов дискретной фильтрации (прежде всего, калмановского типа).

Особую значимость в математическом исследовании аккумуляторов представляют SOC и SOH. State of Charge (SOC) — степень заряда аккумулятора, величина, измеряемая в процентах и показывающая, какая часть от полного заряда еще остается запасенной в аккумуляторе.

Формально SOC может быть выражен как  $SOC = Q/Q_{max}$ , где  $Q = \int_0^t I(t) dt$  — текущий заряд батареи.

State of Health (SOH) — степень работоспособности аккумулятора, отражающая текущее состояние аккумулятора по сравнению с его идеальным состоянием, измеряющаяся в процентах.

Существует несколько подходов к моделированию аккумуляторных батарей. Среди них можно выделить физические электрохимические модели, модели, построенные на основе эмпирических данных (аккумулятор как черный ящик, моделирование с помощью нейросетей) и моделирование с помощью эквивалентных схем.

Динамика работы аккумуляторной батареи может быть разделена на две части: медленная динамика, связанная с процессами разряда и заряда батареи и быстрая динамика, обусловленная внутренним импедансом батареи: сопротивлением электролита и электродов, а также электрохимическими емкостями [1].

Моделирование медленной динамики описывает влияние степени заряда на электрические характеристики аккумулятора и сводится к моделированию зависимости напряжения холостого хода (OCV) от SOC. Данная зависимость слабо зависит от изменений температур и степени деградации аккумулятора. Аппроксимация зависимости  $U_{OCV}(SOC)$  обычно выполняется кусочно-линейно или полиномиально. Одним из наиболее популярных способов аппроксимации является уравнение Шеферда [2], [3]:

$$U_{OCV} = U_0 - R_0 \cdot I - K_I \cdot \frac{f}{1 - f},$$

где  $U_0$  — напряжение разомкнутой цепи при полностью заряженном аккумуляторе (В),  $R_0$  — внутреннее омическое сопротивление аккумулятора (Ом),  $I$  — разрядный ток аккумулятора (А),  $K_I$  — напряжение поляризации (В),  $f = \int \frac{Idt}{Q_0}$  — степень заряженности аккумулятора (SOC) как отношение накопленного заряда к полной емкости аккумулятора,  $Q_0$  — полная емкость аккумулятора (Ач).

Моделирование с помощью эквивалентных схем подразумевает построение модели процессов быстрой динамики, отвечающей за вольт-амперные характеристики аккумуляторной батареи. Эквивалентная схема состоит из резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности

и идеального источника напряжения/тока.

Такой подход позволяет создавать схемы с различной степенью сложности с применением широкого спектра математического аппарата, при этом точность модели коррелирует с ее сложностью.

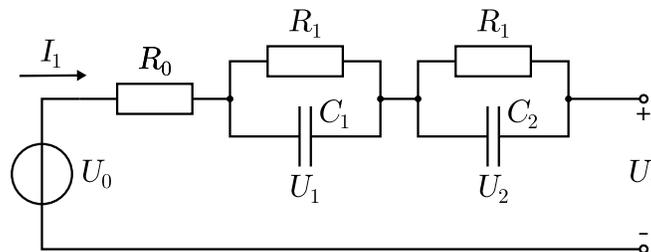
Сюда можно отнести как простые модели, состоящие из внутреннего сопротивления аккумулятора и идеального источника постоянного тока, так и схемы различной модификации, в которые принято добавлять RC-цепочки (резистор-конденсаторы). Чаще всего используются модели, содержащие одну или несколько RC-цепочек [4].

Стоит отметить, что схема, состоящая из одного резистор-конденсатора, носит название модели Тевенена, но такая простая модель имеет достаточно большие расхождения с реальными данными [5].

Рассмотрим модель эквивалентной схемы второго порядка, содержащей две RC-цепочки.

## 1. Математическая модель

На рисунке 1 изображена модель замещения, представляющая собой разомкнутую цепь, состоящую из источника напряжения  $U_0$ , в котором напряжение имеет некоторую зависимость от температуры и SOC, резистора, соответствующего внутреннему сопротивлению батареи  $R_0$ , и двух RC-цепей  $R_1C_1$  и  $R_2C_2$ , моделирующих переходные процессы, проявляющиеся в быстром и медленном падении напряжения аккумулятора под нагрузкой [6].



**Рис. 1.** Электрическая схема эквивалентной RC-модели второго порядка для литий-ионного аккумулятора

Данные переходные процессы связаны с образованием классического двойного электрического слоя в контакте электрод-электролит и образованием пассивной пленки на электродах. Под влиянием этих факторов внутри литий-ионного аккумулятора возникают электрохимические распределенные конденсаторы. В связи с этим, две RC-цепочки моделируют процессы поляризации с образованием объемных емкостей:  $C_1$  — электрохимическая емкость двойного слоя,  $C_2$  — емкость, связанная с интеркаляцией и массообменом лития [7].

Следует заметить, что все параметры модели зависят от SOC, тока нагрузки, температуры и числа циклов заряда/разряда, тем не менее, упрощение модели путем замены сложной нелинейной зависимости линейной зависимостью от некоторых переменных или расчет параметров как независимых дает небольшую ошибку [6].

Степень заряда аккумуляторной батареи вычисляется следующим образом:

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{\int_{t_0}^t i dt}{Q_0} \quad (1)$$

или

$$\dot{SOC}(t) = -\frac{i(t)}{Q_0}, \quad (2)$$

где  $i$  — ток нагрузки, который имеет положительное значение во время заряда и отрицательное во время разряда аккумулятора,  $t$  — время работы, а  $Q_0$  — номинальная емкость аккумулятора.

Истинная емкость аккумулятора зависит от степени работоспособности (SOH) и уменьшается по мере старения аккумулятора. В данной модели процессы деградации батареи не рассматриваются.

В соответствии с основными схемотехническими принципами поведение представленной на рисунке 1 может быть рассчитано следующим образом [9]:

$$\dot{U}_1 = -\frac{U_1}{R_1 C_1} + \frac{I_t}{C_1}, \quad (3)$$

$$\dot{U}_2 = -\frac{U_2}{R_2 C_2} + \frac{I_t}{C_2}, \quad (4)$$

$$U_t = U_0 - U_1 - U_2 - R_0 I_t, \quad (5)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — напряжение на контактах конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , соответственно,  $U_t$  — напряжение на выводах батареи,  $U_0$  — напряжение холостого хода, имеющее нелинейную зависимость от SOC для различных температурных режимов.

Параметры модели  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $C_2$  принимаются постоянными для конкретного температурного режима и определяются на основе экспериментальных данных для исследуемой модели аккумулятора. Зависимость  $U_0$  ( $SOC$ ) также определяется экспериментально по модели Шеффера [8].

Перейдя к дискретной модели в пространстве состояний:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k, \quad (6)$$

$$y_k = C_k x_k + D_k u_k, \quad (7)$$

где  $x_k$  — вектор состояния в момент времени  $k$ ,  $y_k$  — вектор измерений в момент времени  $k$  ( $U_{t_k}$ ),  $u_k$  — вектор входных воздействий в момент времени  $k$  ( $I_{t_k}$ ), а  $A_k$ ,  $B_k$ ,  $C_k$ ,  $D_k$  — матрицы коэффициентов в момент времени  $k$ , получим:

$$\begin{bmatrix} SOC_{k+1} \\ U_{1,k+1} \\ U_{2,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_2 C_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_k \\ U_{1,k} \\ U_{2,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\mu \Delta t}{Q_0} \\ R_1(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_2 C_2}}) \end{bmatrix} I_{t_k}, \quad (8)$$

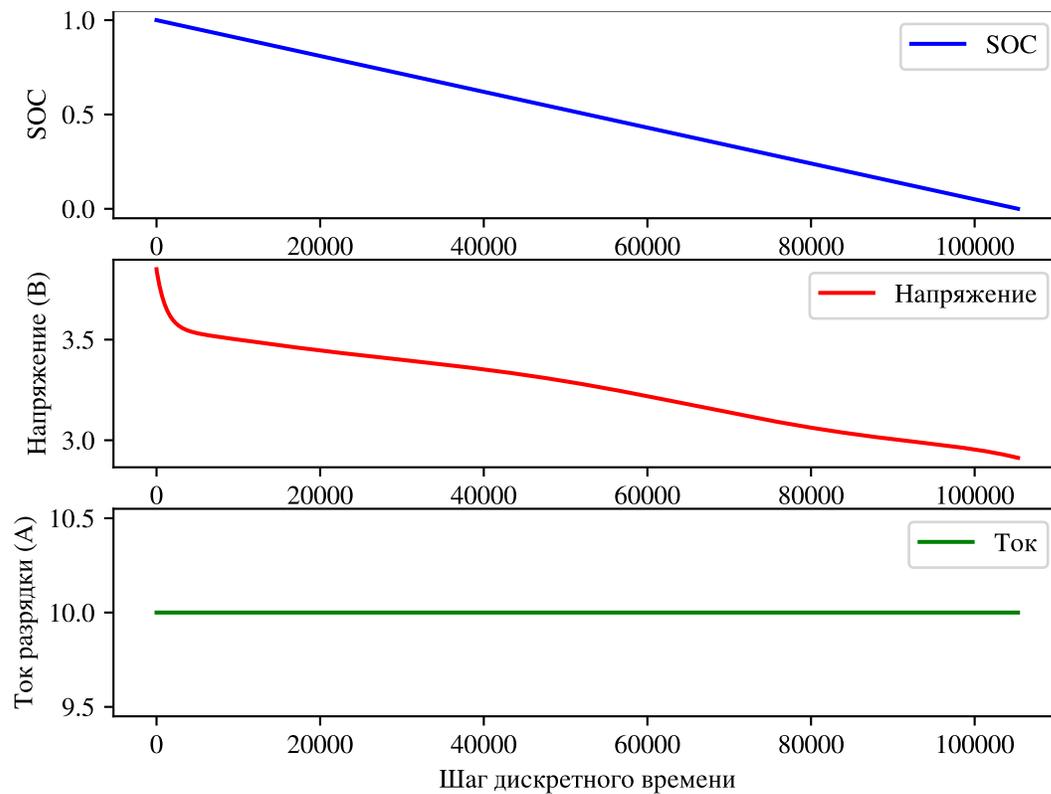
$$U_{t_k} = U_0 - R_0 I_{t_k} - R_1 I_{t_k} e^{-\frac{t_k}{\tau_1}} - R_2 I_{t_k} e^{-\frac{t_k}{\tau_2}}. \quad (9)$$

Таким образом, (8) и (9) образуют дискретную динамическую систему и позволяют производить оценку SOC по данным измерений выходного напряжения.

## 2. Компьютерная реализация

Практическая реализация модели (8), (9) была проведена в интегрированной среде разработки Jupyter Notebook на языке программирования Python с использованием пакета NumPy.

Моделирование проводилось для литий-ионного аккумулятора ICR18650-22p с номинальным напряжением  $U_0 = 3.6$  (В), максимальной емкостью  $Q_0 = 2.15$  (Ач), пороговым значением напряжения отсечки  $U_{cut\ off} = 2.75$  (В) и максимальным током продолжительной разрядки  $I_{max} = 10$  (А).



**Рис. 2.** Графики зависимостей SOC, напряжения и тока разряда от времени при моделировании разряда аккумулятора постоянным током

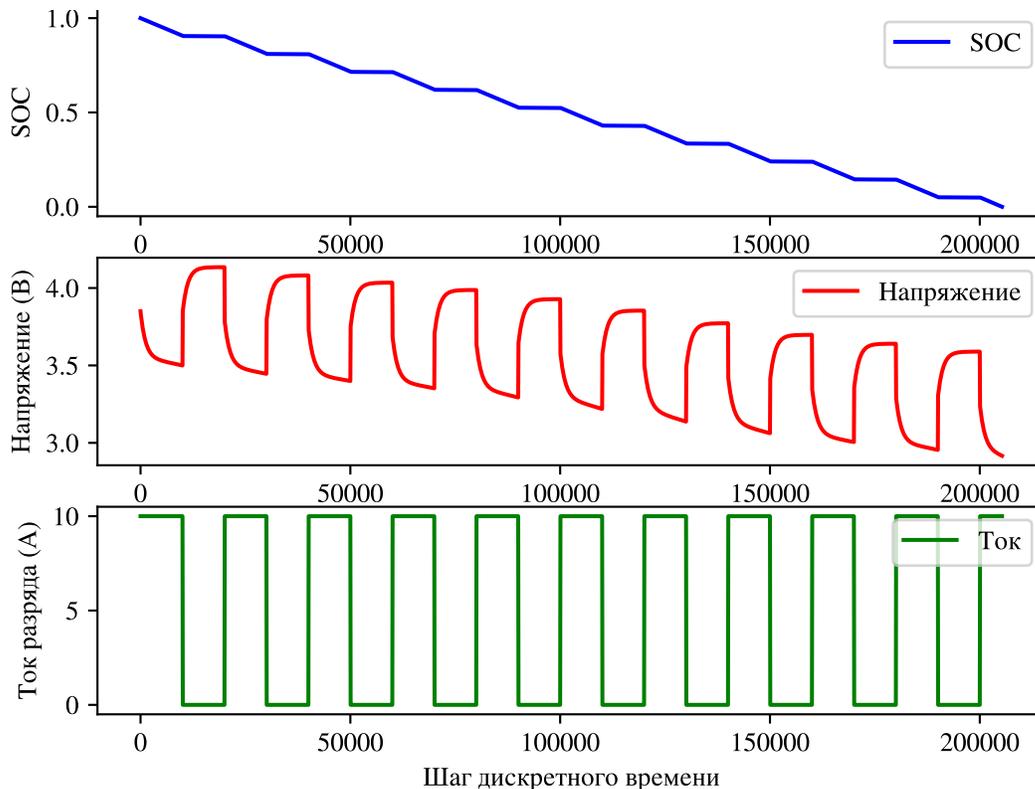
Параметры модели  $R_1, C_1, R_2, C_2$  получены экспериментально для температуры  $T = 25^\circ C$  в [9] и приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Идентифицированные параметры аккумулятора

Параметр	$R_0$ , Ом	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$C_1$ , Ф	$C_2$ , Ф
$T = 25^\circ C$	0.0337	0.0089	0.0209	$1.35 \times 10^4$	$5.77 \times 10^3$

Моделирование проводилось для трех случаев разряда аккумулятора и останавливалось при выполнении одного из следующих условий: пересечение напряжением аккумулятора уровня напряжения отсечки, при достижении параметра SOC значения 0%, или при выполнении максимального числа шагов симуляции 250000.

На рисунке 2 представлены зависимости SOC, напряжения и тока разряда от времени при разряде постоянным током  $I = 10$  (А). На рисунке 3 представлены аналогичные зависимости при разряде пульсирующим током с амплитудой  $\Delta I = 10$  (А), коэффициентом заполнения 50% и периодом следования импульсов 20000 шагов дискретного времени.

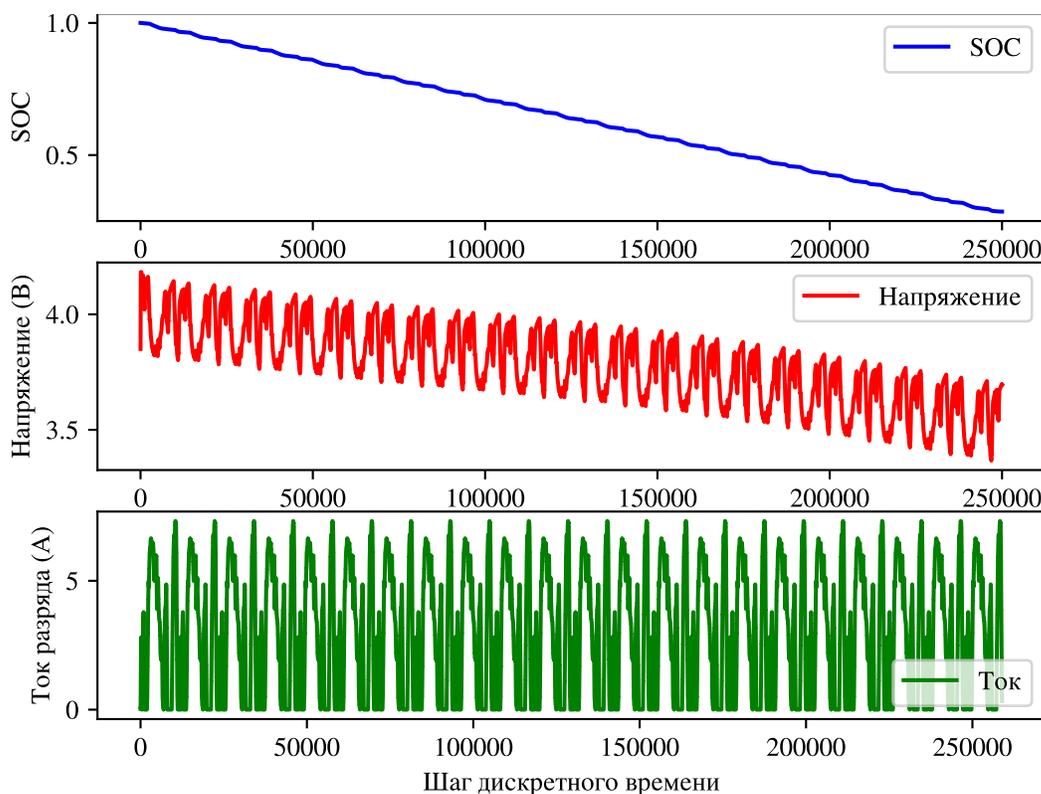


**Рис. 3.** Графики SOC, напряжения и тока разряда при моделировании разряда аккумулятора пульсирующим током

На рисунке 4 представлены зависимости SOC, напряжения и тока разряда от времени при разряде профилем тока WLTC (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure) для класса 1, фазы Low. Данный профиль предназначен для имитации движения легкового автомобиля по городу и оценки расхода топлива, в контексте данной статьи он может применяться для моделирования движения электротранспорта, использующего литий-ионные аккумуляторы. Продолжительность цикла составляет 11800 тактов дискретного времени, цикл повторяется до достижения максимального числа шагов симуляции. Параметры профиля приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Параметры цикла WLTC при разряде аккумулятора

Параметр	Значение
Длительность цикла, тактов дискретного времени	11800
Доля времени остановок, %	26
Максимальная сила тока, А	7.32
Средняя сила тока, А	3.02
Средняя сила тока без учета остановок, А	4.07



**Рис. 4.** Графики SOC, напряжения, и тока разряда при моделировании разряда аккумулятора профилем WLTC

## Заключение

В статье исследована RC-модель второго порядка для литий-ионного аккумулятора, обоснована актуальность ее практического применения для построения дискретной математической модели с целью определения параметра SOC. Выполнена компьютерная реализация данной модели на языке Python, в результате которой получены зависимости параметра SOC и напряжения от времени при постоянном и пульсирующем токе разряда и при разряде током с профилем WLTC.

В дальнейшем планируется проведение исследований различных моделей литий-ионных аккумуляторов с использованием алгоритмов калмановского типа. Актуальными являются задачи разработки новых методов оценки состояния аккумуляторных батарей, основанных на использовании численно эффективных алгоритмов дискретной фильтрации.

Работа выполнена при финансовой поддержке УлГПУ им. И.Н. Ульянова в рамках внутривузовского конкурса грантов, приказ № 102 от 10.04.2023 г.

## Список литературы

1. Tamilselvi S., Gunasundari S., Karuppiyah N., Razak RK A., Madhusudan S., Nagarajan V.M., Sathish T., Shamim M.Z.M., Saleel C.A., Afzal A. A Review on Battery Modelling Techniques // *Sustainability*, 2021, vol. 13, P. 10042.
2. Shepherd C. M. Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge // *Journal of Electrochemical Society*, No. 112(7), 1965, P. 657–664.
3. Доброго К.В., Бладыко Ю.В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, 2021, № 64(1), С. 27–39.
4. Melentjev S., Lebedev D. Overview of Simplified Mathematical Models of Batteries // *Doctoral School of Energy and Geotechnology: Parnu, Estoni*, 2013, P. 231–235.
5. Martínez-Rosas E., Vasquez-Medrano R., Flores-Tlacuahuac A. Modeling and simulation of lithium-ion batteries // *Comput. Chem. Eng.*, 2011, No. 35, P. 1937–1948.
6. M. Chen and G.A. Rincon-Mora, Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance, // *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, Vol. 21, No. 2, P. 504–511.
7. Борисевич А.В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния // *Современная техника и технологии*, 2014, № 5 [Электронный ресурс], URL: <https://technology.snauka.ru/2014/05/3542>.
8. Hanane Hemi, Nacer K M'Sirdi, Aziz Naamane, A new proposed shepherd model of A li-ion open circuit battery based on data fitting // *IMAACA 2019*, Sep 2019, Lisbon, Portugal, fhal-02471659f.
9. Xia B., Guo S., Wang W., Lai Y., Wang H., Wang M., Zheng W. A State of Charge Estimation Method Based on Adaptive Extended Kalman-Particle Filtering for Lithium-ion Batteries // *Energies*, 2018, No. 11(10), P. 2755.

# Computer simulation of the State of Charge (SOC) dynamics of electric batteries

*Chernov, M. B.\**, *Golubkov, A. V.*

\*[chernovmb2002@gmail.com](mailto:chernovmb2002@gmail.com)

Ul'yansovsk State Pedagogical University, Russia

The paper discusses the problem of computer simulation of the state of charge (SOC) dynamics of lithium-ion batteries. A discrete model which is based on the substitution scheme is used for the problem solution. A computer implementation of the model was performed in Python language, during which graphs of SOC and voltage dependence on time were obtained using constant, pulsating direct discharge current and WLTC(Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure) profile current.

**Keywords:** *state of charge, SOC, battery model, equivalent substitution scheme, WLTC*