

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОДСИСТЕМОЙ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.К. Тищенко¹, Р.Ю. Кузьменко¹, Е.М. Васильев²

¹АО «Орбита», г. Воронеж, Россия,

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: решается задача построения инженерной модели функционирования аккумуляторных батарей, пригодной для её практического использования при исследовании процессов управления в автономных системах электроснабжения. В качестве конкретного объекта исследования выбрана батарея с перспективными герметичными никель-водородными аккумуляторами, не требующими прямого обслуживания в процессе эксплуатации. Показано, что теплоэнергетическая часть общей модели функционирования такой батареи может быть представлена неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка с нелинейной правой частью, определяемой внутренним тепловыделением аккумуляторов при заряде и разряде. Для аппроксимации отмеченной нелинейности предложена функция квадратичного вида, на основе экспериментальных данных идентифицированы её параметры, и приведено численное решение дифференциального уравнения. Для электроэнергетической части модели использована базовая алгебраическая модель Нернста, в которую введены слагаемые, отражающие омические потери напряжения в аккумуляторе, а также сомножитель степенного вида, определяющий нелинейное влияние степени заряженности аккумулятора на его напряжение. Взаимосвязь тепловой и электрической частей модели реализована путём включения тока в тепловую часть модели и температуры – в электрическую часть. На построенной модели проведено исследование процессов управления аккумуляторной батареей в номинальном режиме поочерёдного заряда и разряда, в циклическом режиме с недостаточным зарядом и в режиме длительного хранения заряда в охлаждённом состоянии батареи. Представлены результаты указанных исследований, подтверждающие адекватность предложенных моделей

Ключевые слова: автономные системы электроснабжения, подсистема аккумуляторных батарей, никель-водородный аккумулятор, управление циклическими зарядами и разрядами аккумулятора

Введение

Потребность в надёжно функционирующих автономных системах электроснабжения обусловлена возрастающей сложностью пространственно и хронологически длительно обособленных объектов и мобильных средств, требующих для выполнения своих функций бесперебойного обеспечения электрической энергией значительной мощности [1].

Независимо от природы первичного источника энергии (например, атомная, солнечная или тепловая), необходимым условием бесперебойного обеспечения является наличие подсистемы электрохимических аккумуляторных батарей, которая является в настоящее время неотъемлемой частью автономных систем электроснабжения [2, 3].

Циклический принцип действия аккумуляторных батарей, предусматривающий многократное повторение процессов заряда и разряда во взаимодействии с первичным источником энергии требует разработки алгоритмов управления этими процессами, что в свою очередь предполагает создание соответствующих моде-

лей, описывающих состояние батарей в различных режимах указанного взаимодействия [4, 5].

Наиболее актуально потребность в таком управлении ощущается в системах электроснабжения космических аппаратов, в которых длительное и непрерывное функционирование батарей характеризуется десятками тысяч циклов заряда и разряда, приводящих к быстрой деградации аккумуляторов при отсутствии надлежащего управления [6, 7, 8].

Широко известным видом аккумуляторных батарей, удовлетворяющих требованиям эксплуатации в космосе, являются никель-водородные батареи, отличающиеся высокой надёжностью и относительно низкими затратами на изготовление и эксплуатацию [9]. Необходимость исследований по моделированию и разработке алгоритмов управления процессами в этих батареях отмечается, в частности, в работах [7, 10].

Модели функционирования никель-водородных батарей рассмотренные, например, в статье [11], используют статические регрессионные зависимости, связывающие напряжение на аккумуляторе и мощность тепловых потерь в нём с токами заряда и разряда, температурой и степенью заряженности.

В работе [12] предложены распределенные тепловые модели аккумуляторной батареи, требующие использования программного комплекса Comsol Multiphysics.

Предлагаемая статья посвящена развитию результатов, полученных в упомянутых выше работах, и содержит решение следующих задач:

1) составление удобной для инженерной практики динамической модели никель-водородной аккумуляторной батареи как объекта управления;

2) использование модели для исследования переходных и установившихся процессов в подсистеме аккумуляторных батарей в различных режимах её циклического заряда-разряда и режима хранения энергии.

Теплоэнергетическая модель батареи

Будем рассматривать батарею как эквивалентную гомогенную физическую систему массой m (кг), обладающей удельной теплоёмкостью c (Дж/(кг·К)) при постоянном объёме.

Тогда для изменения температуры T внутренней среды батареи на значение dT путём теплопередачи потребуется сообщить ей количество теплоты dQ :

$$dQ = cm \cdot dT. \quad (1)$$

Указанное количество dQ теплоты определяется двумя составляющими: изменением внутренней энергии $dQ_{\text{внутр}}$ в результате выделения или поглощения теплоты в ходе электрохимических преобразований в аккумуляторах батареи, и изменением $dQ_{\text{ср}}$ в результате передачи тепла от батареи во внешнюю среду – охлаждающую плиту, температуру $T_{\text{ср}}$ которой примем постоянной.

В соответствии с законом сохранения энергии:

$$dQ = dQ_{\text{внутр}} - dQ_{\text{ср}}. \quad (2)$$

В то же время по закону Ньютона-Рихмана для теплопередачи имеем:

$$dQ_{\text{ср}} = kS(T - T_{\text{ср}}) \cdot dt, \quad (3)$$

где k – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

S – эквивалентная площадь условной теплопроводной поверхности, через которую осуществляется теплообмен батареи с внешней средой, м²;

dt – рассматриваемый интервал времени, на котором осуществляется теплообмен, с.

Подставляя (1) и (3) в (2) получим:

$$cm \cdot dT = dQ_{\text{внутр}} - kS(T - T_{\text{ср}}) \cdot dt, \quad (4)$$

или, в дифференциальной форме:

$$\frac{cm}{kS} \cdot \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = \frac{1}{kS} \cdot \frac{dQ_{\text{внутр}}(t)}{dt} + T_{\text{ср}}. \quad (5)$$

Отметим, что первое слагаемое в правой части дифференциального уравнения (5) содержит мощность $W_{\text{внутр}}(t)$ внутреннего тепловыделения:

$$\frac{1}{kS} \cdot \frac{dQ_{\text{внутр}}(t)}{dt} = \frac{1}{kS} \cdot W_{\text{внутр}}(t), \quad (6)$$

и имеет размерность температуры.

Введём обозначения:

$$\frac{cm}{kS} = T_i; \quad \frac{1}{kS} \cdot \frac{dQ_{\text{внутр}}(t)}{dt} = T_{\text{внеш}}(t), \quad (7)$$

где T_i – постоянная времени тепловых процессов, с;

$T_{\text{внеш}}(t)$ – нестационарная температура внешнего источника теплоты, к которому приведён внутренний источник теплоты.

В результате подстановки (7) в (6) и дополнительного обозначения:

$$T_{\text{внеш}}(t, I) + T_{\text{ср}} = T_{\text{эв}}(t, I), \quad (8)$$

получим простое для идентификации параметров и численного решения дифференциальное уравнение первого порядка:

$$T_i \cdot \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = T_{\text{эв}}(t). \quad (9)$$

В частности, для батареи из 72-х последовательно соединённых 1,5-вольтовых никель-водородных аккумуляторов правая часть уравнения (9) в режиме заряда током I_3 аппроксимируется нелинейной функцией:

$$T_{\text{эв},i} = T_{\text{эв},i-1} [1 + (z_1 + T_{\text{эв},i-1}) \cdot \alpha(I_{3,i-1}) \cdot z_2], \quad (10)$$

в которой множитель $\alpha(I_3)$ имеет вид квадратичной функции от тока I_3 заряда:

$$\alpha(I_{3,i-1}) = z_3 I_{3,i-1} + z_4 I_{3,i-1}^2. \quad (11)$$

Параметры z_1, z_2, z_3, z_4 – постоянные коэффициенты.

Для режима разряда выражения, аналогичные (10) и (11), имеют вид (12), (13) и содержат величину тока I_p разряда:

$$T_{\text{эв},i} = T_{\text{эв},i-1} [1 + (r_1 + T_{\text{эв},i-1}) \cdot \beta(I_{p,i-1}) \cdot r_2], \quad (12)$$

$$\beta(I_{p,i-1}) = r_3 I_{p,i-1} - r_4 I_{p,i-1}^2, \quad (13)$$

где r_1, r_2, r_3, r_4 постоянные параметры.

При решении дифференциального уравнения (9) переходы между режимами заряда и разряда осуществляются подстановкой в (9) выражений (10) или (12) соответственно.

Результаты решения уравнения (9) для отдельно рассматриваемых режимов заряда и разряда показаны на рис. 1.

Графики на рис. 1 соответствуют параметрам $z_1 = 70$ °C; $z_2 = 2 \cdot 10^{-6}$ 1/°C; $z_3 = 0,025$ 1/A; $z_4 = 0,0017$ 1/A²; $r_1 = 2750$ °C; $r_2 = 1,77 \cdot 10^{-7}$ 1/°C; $r_3 = 0,067$ 1/A; $r_4 = 0,001$ 1/A².

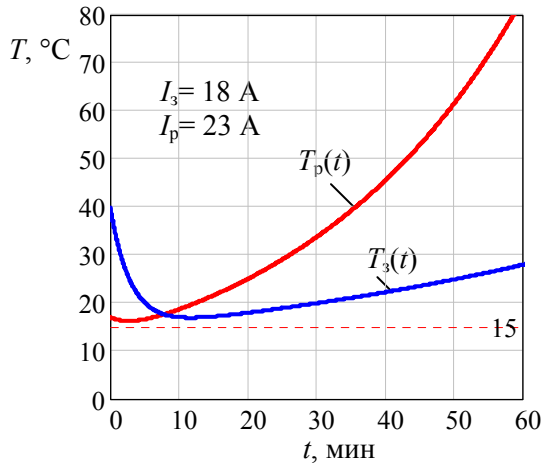


Рис. 1. Изменение температуры батареи в процессе заряда ($T_3(t)$) и разряда ($T_p(t)$)

Использовались граничные условия: $T_3(0) = 17$ °C; $I_3(t) = 18$ А; $T_p(0) = 40$ °C; $I_p(t) = 23$ А; $T_i = 180$ с; заряженность (ёмкость) G батареи в начале процесса заряда $G(0) = 13$ А·ч, в начале процесса разряда $G(0) = 27$ А·ч. Номинальная ёмкость батареи $G_{ном} = 41$ А·ч.

Электроэнергетическая модель батареи

Для построения зарядно-разрядной характеристики $U(G)$ изменения напряжения U батареи от её заряженности G воспользуемся базовой электроэнергетической моделью для одного аккумулятора, представленной в работе [13]:

$$U_{ак} = E + \frac{R \cdot (T + 273)}{\phi_1 F} \cdot \ln P + R_{ак} I, \quad (14)$$

где E – ЭДС электрохимической пары «никель-водород», $E = 1,5$ В;

R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж/(моль·К);

T – температура внутренней среды аккумулятора, °C;

ϕ_1 – постоянный коэффициент;

F – постоянная Фарадея, $F = 96485$ Кл/моль;

P – давление в аккумуляторе, кг/см²;

$R_{ак}$ – внутреннее сопротивление аккумулятора, Ом;

I – ток, протекающий через аккумулятор (положительный при заряде, отрицательный при разряде), А.

Введём в модель (14) поправочные элементы, определяемые экспериментально, и учитывающие нелинейное влияние на напряжение заряженности G батареи, а также постоянную составляющую ϕ_3 :

$$U_{ак} = E + \frac{R \cdot (T + 273)}{\phi_1 F} \cdot \left(\frac{G}{G_{ном}} \right)^{\phi_2} \cdot \ln P + R_{ак} I - \phi_3, \quad (15)$$

Взаимосвязь между переменными в (15), а также между тепловыми (9) и электрическими (15) процессами в аккумуляторе с достаточной для практики точностью определим выражениями

$$R_{ак} = \gamma_1 (1 - \gamma_2 T); \quad (16)$$

$$P = \sigma G, \quad (17)$$

с постоянными коэффициентами $\gamma_1 = 6,5 \cdot 10^{-3}$ Ом, $\gamma_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ 1/°C; $\sigma = 1,55$ (кг/м²)/(А·ч).

Текущая ёмкость G аккумулятора в (15) в момент времени t вычисляется с учётом тока I_{cp} саморазряда:

$$G(t) = G(0) + \int_0^t (\eta I - I_{cp}) dt. \quad (18)$$

При численном интегрировании с шагом h (в секундах) выражение (18) приобретает вид:

$$G_i = G_{i-1} + \frac{h}{60 \cdot 60} \cdot (\eta I_{i-1} - I_{cp}). \quad (19)$$

Коэффициент $\eta = [0; 1]$, характеризующий эффективность зарядно-разрядного процесса зависит от текущей заряженности аккумулятора и его температуры.

Экспериментально для рабочих диапазонов аккумулятора определены зависимости η_z для заряда и η_p для разряда:

$$\eta_z = 1 - z_5 \left(\frac{G}{G_{ном}} + z_6 T - z_7 \right), \quad (20)$$

$$\eta_p = r_5 \left(1 + e^{-r_6 \frac{G}{G_{ном}}} \right) - r_7 T. \quad (21)$$

Поскольку рассматриваемый вариант батареи содержит 72 последовательно соединённых аккумулятора, то полное напряжение U батареи принято равным $U = 72 U_{ак}$.

Исследование работы батареи в различных режимах

Для полного представления процессов в аккумуляторной подсистеме электроснабжения

с никель-водородными батареями рассмотрим три наиболее характерных режима её работы:

1) номинальный режим непрерывного попеременного заряда и разряда;

2) режим недостаточного заряда, при котором в процессе заряда батарея получает меньше электрической энергии, чем отдаёт её в процессе разряда;

3) режим длительного (дежурного) хранения заряда, в течение которого батарея не отдаёт ток в нагрузку, и подключается к системе электроснабжения только при необходимости.

На рис. 2 представлен фрагмент непрерывного циклического процесса заряда и разряда с соответствующими токами $I_3 = 18$ А, $I_p = 23$ А.

Длительность интервала заряда составляет 56 мин, длительность разряда 36 мин. При выбранных токах заряда и разряда указанные длительности этих процессов изменяют заряженность $G(t)$ батареи в пределах 12...27 А·ч, что при номинальной ёмкости $G_{\text{ном}} = 41$ А·ч, соответствует щадящему режиму её эксплуатации.

Максимальный заряд батареи ограничен давлением $P_{\text{макс}} = 42$ кг/м², при достижении которого при $t = 50$ мин заряд прекращается, и до начала разряда ($t = 56$ мин) батарея не отдаёт ток в нагрузку и находится в режиме саморазряда.

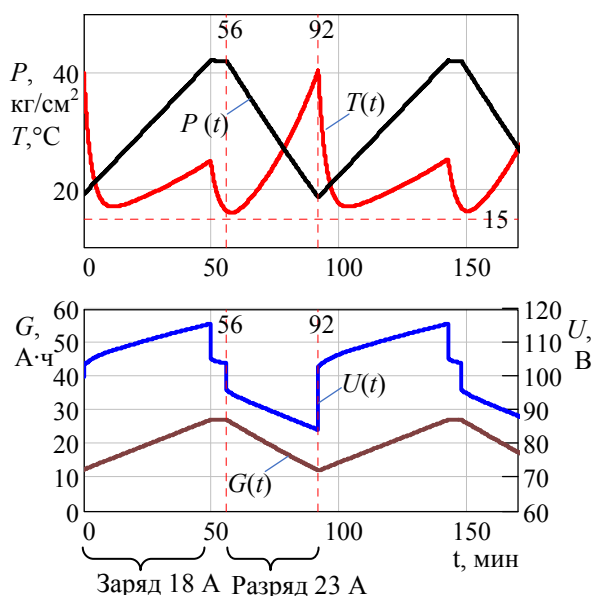


Рис. 2. Переходные процессы в батарее в режиме периодического заряда и разряда

Переходы между режимами заряда и разряда сопровождаются значительными скачками напряжения, парирование которых осуществляет аппаратура регулирования и контроля системы.

На рис. 3 показаны переходные процессы в подсистеме аккумуляторных батарей в режиме недостаточного заряда: $I_3 = 10$ А, $I_p = 30$ А.

Для рис. 3 можно отметить, что за время $t = 56$ мин заряда батарея из-за малого тока $I_3 = 10$ А не успевает зарядиться до давления $P_{\text{макс}} = 42$ кг/м². Поэтому переход от режима заряда к режиму разряда происходит непосредственно, без промежуточного состояния батареи в режиме с саморазрядом. При этом ограничением на степень разряда является уровень напряжения $U_{\text{мин}} = 72$ В.

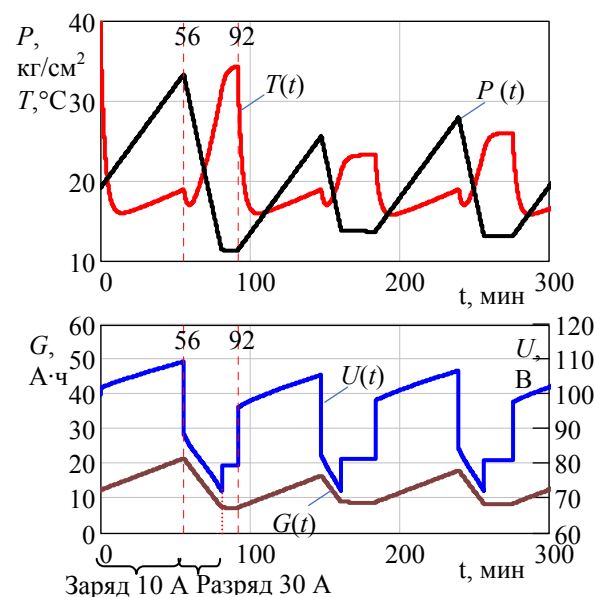


Рис. 3. Переходные процессы в батарее в режиме недостаточного заряда

При падении напряжения до уровня $U_{\text{мин}}$ разряд батареи принудительно прекращается с сохранением остаточного напряжения около 80 В, и батарея вступает в работу только при очередном интервале заряда. В результате подсистема аккумуляторных батарей в состоянии отдавать ток в нагрузку только часть интервала разряда (по рис. 3 в интервале $t = [56; 80]$ мин, т.е. примерно 67 % от интервала разряда).

Результаты моделирования в режиме хранения заряда представлены на рис. 4.

В этом режиме аккумулятор отключен от нагрузки, и после полного заряда переходит в состояние саморазряда с током $I_{\text{ср}} = 0,15$ А. В течение примерно 20-ти часов давление в аккумуляторе постепенно снижается до уровня уставки 38 В, и происходит повторный заряд батареи до давления $P_{\text{макс}} = 42$ кг/м². После этого батарея вновь переводится в режим хранения и состояние саморазряда.

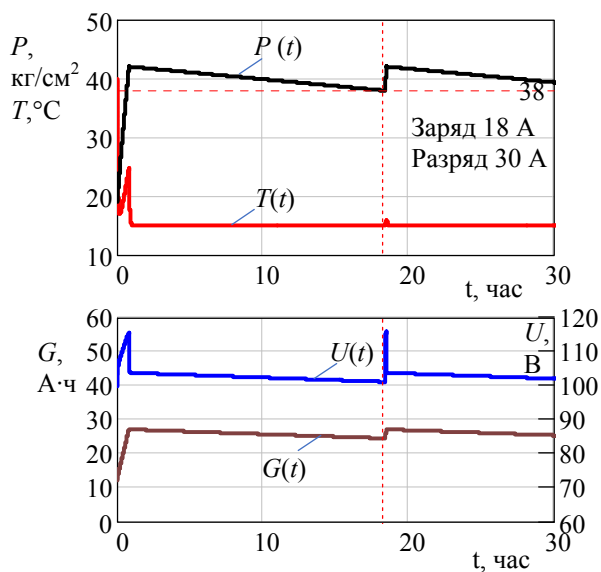


Рис. 4. Переходные процессы в батарее в режиме хранения заряда

Заключение

1. Высокая степень неопределённости текущего состояния компонентов аккумуляторных батарей (электродов, активности электролита и т.п.) приводит к необходимости создания инженерных моделей этих батарей, т.е. модификации классических соотношений для тепловых и электрических процессов в них с точностью до постоянных составляющих и множителей с показателями степени, определяемыми экспериментально.

2. В соответствии с указанным обстоятельством в известную модель теплообмена аккумулятора с внешней средой введены элементы, отражающие нелинейную зависимость тепловыделения в нём от текущего значения тока в режимах заряда и разряда. Дополнительно в электроэнергетическую модель батареи по Нернсту включён сомножитель, определяющий изменение интенсивности заряда и разряда аккумуляторов в зависимости от значения их относительной заряженности.

3. Исследование переходных процессов на полученных моделях подтверждает их способность адекватного воспроизведения реальных процессов управления подсистемой аккумуляторных батарей в различных режимах её работы.

Литература

1. Global energy review 2025 / International Energy Agency. France: IEA, 2025. 41 p.
2. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Системы многоальтернативного управления. Эволюционный подход. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2023. 380 с.
3. Тищенко А.К., Васильев Е.М., Тищенко А.О. Многоальтернативное управление критическими режимами системы электроснабжения космической станции // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 2. С. 101-106.
4. Лесных А.Н., Ловчиков А.Н., Лукьяненко М.В. Методы моделирования и синтеза систем электропитания космических аппаратов. Красноярск: Издательство Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева, 2015. 120 с.
5. Энергобаланс научно-энергетического модуля при его автономном полете и интеграции в российский сегмент международной космической станции / Ю.С. Елизаров [и др.] // Космическая техника и технологии. 2019. № 4. С. 38-44.
6. Savenkov V.V., Tishchenko A.K., Volokitin V.N. Control and regulation equipment of electric power system for a prospective piloted transport system. Siberian Journal of Science and Technology. 2019. Vol. 20. No. 2. P. 236-242.
7. Ковтун В.С. Методика когнитивно-синергетического наблюдения и проактивного управления энергоёмкостью никель-водородных аккумуляторных батарей геостационарного космического аппарата // Космическая техника и технологии. 2022. № 1. С. 109-124.
8. Сахнов М.Ю. Управление режимом работы никель-водородных аккумуляторных батарей с большим количеством аккумуляторов в составе геостационарных космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М.Ф. Решетнева. 2010. № 2. С. 137-141.
9. Проектирование системы энергоснабжения научно-энергетического модуля для российского сегмента Международной космической станции / А.Г. Бидеев [и др.] // Космическая техника и технологии. 2015. № 2. С. 64-74.
10. Jiang T., Chen W., Nickel hydrogen gas batteries: From aerospace to grid-scale energy storage applications // Current Opinion in Electrochemistry. 2021. Vol. 30. 100859.
11. Лукьяненко М.В. Энергетическая модель никель-водородных аккумуляторов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М.Ф. Решетнева. 2005. № 4. С. 67-71.
12. Сахнов М. Ю., Лелеков А.Т., Галочкин С.А. Распределенная энерготепловая модель никель-водородной аккумуляторной батареи 40НВ-70 // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М.Ф. Решетнева. 2010. № 4. С. 114-120.
13. Ценер Б.И., Лызов Н.Ю. Металл-водородные электрохимические системы. Теория и практика. Л.: Химия, 1989. 282 с.

Поступила 06.08.2025; принята к публикации 06.10.2025

Информация об авторах

Тищенко Анатолий Константинович – канд. техн. наук, начальник отдела, АО «Орбита» (394038, Россия, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, 88), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел.: +7 (473) 243-77-20

Кузьменко Роман Юрьевич – начальник сектора, АО «Орбита» (394038, Россия, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, 88), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел.: +7 (473) 243-77-20

Васильев Евгений Михайлович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9008-5364

MODELING AND STUDYING CONTROL PROCESSES OF A BATTERY SUBSYSTEM AS PART OF AN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM

A.K. Tishchenko¹, R.Yu. Kuz'menko¹, E.M. Vasil'ev²

¹JSC «Orbita», Voronezh, Russia,

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the problem of constructing an engineering model of battery operation suitable for its practical use in studying control processes in autonomous power supply systems is solved. A battery with promising sealed nickel-hydrogen batteries that do not require direct maintenance during operation is selected as a specific object of study. It is shown that the heat-and-power part of the general model of such a battery operation can be represented by a first-order inhomogeneous differential equation with a nonlinear right-hand side determined by the internal heat release of the batteries during charging and discharging. To approximate the noted nonlinearity, a quadratic function is proposed, its parameters are identified based on experimental data, and a numerical solution of the differential equation is given. For the electric power part of the model, the basic Nernst algebraic model is used, which includes terms reflecting Ohmic voltage losses in the battery, as well as a power-law factor determining the nonlinear effect of the battery charge state on its voltage. The relationship between the thermal and electrical parts of the model is implemented by including current in the thermal part of the model, and temperature in the electrical part. The constructed model was used to study the processes of control the storage battery in the nominal mode of alternate charge and discharge, in the cyclic mode with insufficient charge and in the mode of long-term charge storage in the cooled state of the battery. The results of these studies are presented, confirming the adequacy of the proposed models

Key words: autonomous power supply systems, battery subsystem, nickel-hydrogen battery, control of cyclic charges and discharges of the battery

References

1. International Energy Agency "Global energy review 2025", France: IEA, 2025, 41 p.
2. Podval'ny S.L., Vasil'ev E.M. "Multialternative control systems. Evolutionary approach" ("Sistemy mnogoal'ternativnogo upravleniya. Evolyutsionnyy podkhod"), Stary Oskol: TNT, 2023, 380 p.
3. Tishchenko A.K., Vasil'ev E.M., Tishchenko A.O. "Multi-alternative control of critical modes of a space station's power supply system", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 101-106.
4. Lesnykh A.N., Lovchikov A.N., Lukyanenko M.V. "Methods of modeling and synthesis of spacecraft power supply systems" ("Metody modelirovaniya i sinteza sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov"), Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev, 2015, 120 p.
5. Elizarov Yu.S., Kuznetsov A.V., Abdulkhalikov R.M., Bideev A.G., Khamits I.I. "Energy balance of the scientific and power module during its autonomous flight and integration into the Russian segment of the international space station", *Space Equipment and Technologies (Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii)*, 2019, no. 4, pp. 38-44.
6. Savenkov V.V., Tishchenko A.K., Volokitin V.N. "Control and regulation equipment of electric power system for a prospective piloted transport system", *Siberian Journal of Science and Technology*, 2019, vol. 20, no. 2, pp. 236-242
7. Kovtun V.S. "Methodology of cognitive-synergetic observation and proactive control of the energy capacity of nickel-hydrogen batteries of a geostationary spacecraft", *Space Equipment and Technologies (Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii)*, 2022, no. 1, pp. 109-124.
8. Sakhnov M.Yu. "Control of the operating mode of nickel-hydrogen batteries with a large number of batteries as part of geostationary spacecraft", *Bulletin of Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akad. M.F. Reshetneva)*, 2010, no. 2, pp. 137-141.
9. Bideev A.G., Semin A.Yu., Kuznetsov A.V., Akhmedov M.R. "Design of the power supply system of the scientific and energy module for the Russian segment of the International Space Station", *Space Equipment and Technologies (Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii)*, 2015, no. 2, pp. 64-74.
10. Jiang T., Chen W. "Nickel hydrogen gas batteries: From aerospace to grid-scale energy storage applications", *Current Opinion in Electrochemistry*, 2021, vol. 30, 100859.
11. Lukyanenko M.V. "Energy model of nickel-hydrogen batteries", *Bulletin of Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akad. M.F. Reshetneva)*, 2005, no. 4, pp. 67-71.
12. Sakhnov M.Yu., Lelekov A.T., Galochkin S.A. "Distributed energy and heat model of the nickel-hydrogen storage battery 40NV-70", *Bulletin of Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akad. M.F. Reshetneva)*, 2010, no. 4, pp. 114-120.
13. Center B.I., Lyzlov N.Yu. "Metal-hydrogen electrochemical systems. Theory and practice" ("Metall-vodorodnye elektrokhimicheskie sistemy. Teoriya i praktika"), Leningrad: Khimiya, 1989, 282 p.

Submitted 06.08.2025; revised 06.10.2025

Information about the authors

Anatoliy K. Tishchenko, Cand. Sc. (Technical), JSC «Orbita» (88 Peshe-Streletskaya str., Voronezh 394038, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel. (473) 243-77-20

Roman Yu. Kuz'menko, Orbita JSC (88 Peshe-Streletskaya str., Voronezh 394038, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel.: +7 (473) 243-77-20

Eugeny M. Vasil'ev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Octyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel.: +7 (473) 243-77-20, ORCID 0000-0002-9008-5364