Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. № 1 (23). С. 81-88.
ISSN 2658-3488 print, ISSN 2658-6436 online
Automation and modeling in design and management. 2024. № 1 (23). P. 81-88.

Электротехнические комплексы и системы

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.314.58
doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-81-88

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ

Максим Сергеевич Сиротский[1]✉, Александр Анатольевич Пугачев[2]
[1,2] Брянский государственный технический университет, Брянск, Брянская область, Россия
[1] sirotskiyms@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-0269-3031
[2] alexander-pugachev@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-1836-0923

Аннотация. *Проведен анализ рынка источников бесперебойного питания, который показал актуальность исследований работы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, в том числе в направлении повышения срока их эксплуатации. Целью статьи является разработка математической модели для оценки срока службы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Математическая модель разработана на основе экспериментальных значений, указанных в технической документации основных производителей свинцово-кислотных аккумуляторов, для обработки которых применены численные методы. Приведена эквивалентная тепловая схема замещения аккумуляторной батареи. В результате получены аналитические зависимости максимального количества циклов и скорости старения различных герметизированных аккумуляторных батарей от глубины разряда и их температуры как основных факторов, влияющих на процесс старения. Адекватность полученных результатов обеспечивается удовлетворительной сходимостью со справочными данными. На основании полученных результатов даны рекомендации по обеспечению требуемых параметров надежности с учетом основных алгоритмов работы источников бесперебойного питания и спектра внешних воздействий и конструктивных особенностей аккумуляторных батарей.*

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, источник бесперебойного питания, срок службы, скорость старения, интерполяция, количество циклов, глубина разряда, температура

Для цитирования: Сиротский М.С., Пугачев А.А. Математическое моделирование срока службы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей для источников бесперебойного питания // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №1 (23). С. 81-88. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-81-88.

Original article
Open Access Article

MATHEMATICAL MODELING OF LIFETIME OF LEAD ACID BATTERIES FOR UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES

Maksim S. Sirotskiy[1]✉, Alexander A. Pugachev[2]
[1, 2] Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation
[1] sirotskiyms@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-0269-3031
[2] alexander-pugachev@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-1836-0923

Abstract. *An analysis of the uninterruptible power supply market was carried out, which showed the relevance of research on the operation of lead-acid batteries, including in the direction of increasing the term of their exploitation. The purpose of the article is to develop a mathematical model for assessing the lifetime of lead-acid batteries. The mathematical model is developed on the basis of experimental readings specified in the technical documentation of the main manufacturers of lead-acid batteries, for the processing of which numerical methods are used. An equivalent thermal circuit for battery replacement is shown. As a result, analytical dependencies of the maximum number of cycles and the*

© Сиротский М.С., Пугачев А.А., 2024

aging rate of various sealed batteries on the discharge depth and their temperature as the main factors affecting the aging process are obtained. The adequacy of the results obtained is ensured by satisfactory convergence with the reference data. Based on the obtained results, recommendations are given to ensure the required reliability parameters, taking into account the main algorithms of operation of uninterruptible power supply sources and the spectrum of external effects and design features of storage batteries.

Keywords: battery, uninterruptible power supply, lifetime, aging rate, interpolation, number of cycles, discharge depth, temperature

For citation: Sirotskiy M.S., Pugachev A.A. Mathematical Modeling of Lifetime of Lead Acid Batteries for Uninterruptible Power Supplies. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 1 (23). pp. 81-88. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-81-88.

Введение

Анализ рынка аккумуляторных батарей источников бесперебойного питания показывает постоянный рост, их количество в России в настоящее время составляет несколько миллионов. Расширение диапазона применения аккумуляторных батарей происходит не только в промышленности, но и на транспорте и энергетике [1, 2]. Наибольшая доля аккумуляторов произведена и поставлена зарубежными компаниями (DELTA Battery, Ippon, CSB Energy Technology, Leoch Battery Technology, Ventura и др.).

Большая часть аккумуляторов для источников бесперебойного питания имеет срок эксплуатации 5…12 лет. При этом опыт использования таких аккумуляторов показывает, что средний ресурс их эксплуатации составляет 3…5 лет, а зачастую и меньше.

Основную долю рынка аккумуляторных батарей для источников бесперебойного питания в настоящее время занимают свинцово-кислотные аккумуляторы.

По типу электролита свинцово-кислотные аккумуляторы делятся на три вида:

1) негерметичные с жидким электролитом в виде разбавленной серной кислоты;

2) герметизированные батареи Gel с электролитом, загущенным при помощи силикагеля (SiO2);

3) герметизированные батареи AGM (Absorbent Glass Mat или «абсорбирующее стекловолокно») с электролитом в виде пропитанного волокна.

Результаты сравнения аккумуляторных батарей GEL и AGM показаны на рис. 1.

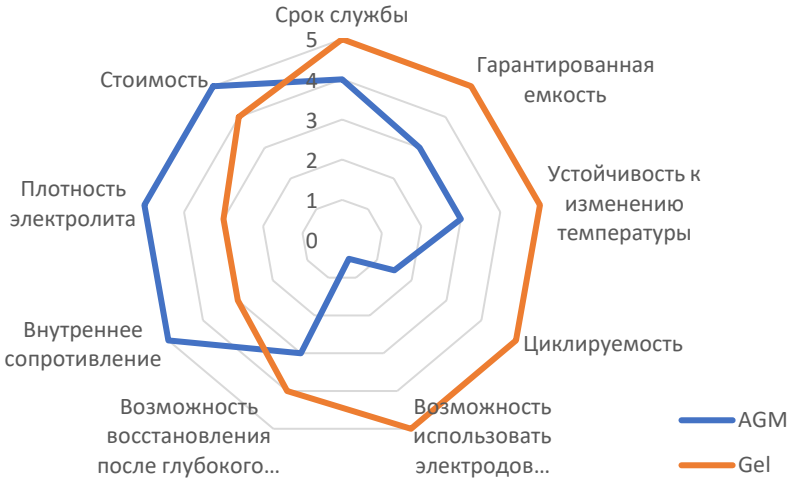


Рис. 1. Сравнение свинцово-кислотных аккумуляторов GEL и AGM
Fig. 1. Comparison of lead-acid GEL and AGM batteries

Анализ результатов сравнения показывает, что аккумуляторы с AGM используются в источниках бесперебойного питания в основном для буферного режима с неглубокими разрядами, поскольку обладают преимуществом в стоимости и не требуют повышенного количества зарядно-разрядных циклов.

Проблеме компьютерного и математического моделирования аккумуляторных батарей

посвящен ряд работ [3, 4]; имеются исследования, учитывающие изменение срока службы из-за деградации параметров [5, 6]. В [7] описано применительно к свинцово-кислотным батареям несколько методов в оценке срока службы. Первый метод использует физико-химическую модель старения, основанную на изучении химических и электрохимических реакций. Второй метод основан на предположении, что деградация батареи влияет на ее первоначальную номинальную емкость. Третий метод основан на использовании кривой Велера, которая моделирует скорость старения в зависимости от количества циклов. Для электрохимических систем такой подход справедлив при выполнении нескольких условий. В [8] приведены эмпирические зависимости количества циклов от ряда эксплуатационных факторов. В [9] приведен анализ физических процессов старения в зависимости от температуры аккумулятора и ее колебаний, в [10] проанализированы методы исследования влияния температуры на срок службы аккумулятора. В [11] исследованы зависимости параметров эквивалентной схемы замещения аккумуляторной батареи от тока заряда-разряда, количества заряда и температуры. Особенностям процесса нагрева и охлаждения аккумуляторных батарей и проблеме управления ими посвящены работы [12, 13, 14].

Целью настоящей статьи является разработка нового подхода к моделированию оценки срока службы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Предлагаемая методика основана на математических моделях старения в зависимости от глубины разряда θ_P и температуры T. Новая модель разработана с использованием экспериментальных значений, указанных в технической документации основных производителей свинцово-кислотных аккумуляторов, численных методов обработки экспериментальных данных. Адекватность математической модели подтверждается удовлетворительным совпадением полученных результатов со справочными данными.

Модель определения срока службы относительно глубины разряда

На основе данных от основных производителей аккумуляторных батарей, предназначенных для источников бесперебойного питания, составлена табл. 1, характеризующая срок службы, взаимосвязанный с количеством циклов и глубиной разряда.

Таблица 1

Зависимость количества циклов от глубины разряда

Table 1

Dependence of number of cycles on discharge depth

№ п.	Производитель	Модель (тип электролита AGM)	Тип электролита	Срок службы в буферном режиме, лет	Количество циклов при различной глубине разряда		
					30 %	50 %	100 %
1	DELTA Battery	HR6-4.5...HR12-26	AGM	8	1200	450	250
2	DELTA Battery	HR12-40...HR12-100	AGM	10…12	1300	550	300
3	DELTA Battery	HR12-21W...HR12-80W	AGM	8	1200	550	300
4	DELTA Battery	HRL12-7.2X...HRL 12-180X, HRL12-155W...HRL 12-890W	AGM	12	1300	600	300
5	CSB Energy Technology	GP645…GP121000, HR12120W, UPS123606, GPL12120…GPL12260, GPL12400…GPL121000	AGM	5…10	1200	450	260
6	IPPON	IP12-5…IP12-17, IP12-100…IP12-200, IPL12-7…IPL12-65	AGM	5…10	1200	450	250
7	Leoch Battery Technology	DJW12-4,5…DJW12-33, DJM12-38…DJM12-250	AGM	8…12	1200	450	250
8	Ventura	GP, GPL, HR, HRL	AGM	6…12	1200	450	250

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что максимальное количество циклов во всем диапазоне изменения глубины разряда имеет модель в п. 4; минимальное количество циклов имеют модели в пп. 1, 6 – 8. На основе полученных данных для определения области зависимостей максимального количества циклов от глубины разряда и дальнейшего построения математической модели, проведем степенную интерполяцию для минимальных и максимальных значений:

$$N_{1678} = 205{,}05\theta_{\text{P}}^{-1{,}446}; \quad (1)$$

$$N_4 = 268{,}27\theta_{\text{P}}^{-1{,}338}, \quad (2)$$

где N_{1678} – количество циклов заряда-разряда в части пп. 1, 6 – 8 табл. 1; N_4 – количество циклов заряда-разряда в части п. 4 табл. 1; θ_{P} – глубина разряда (в долях).

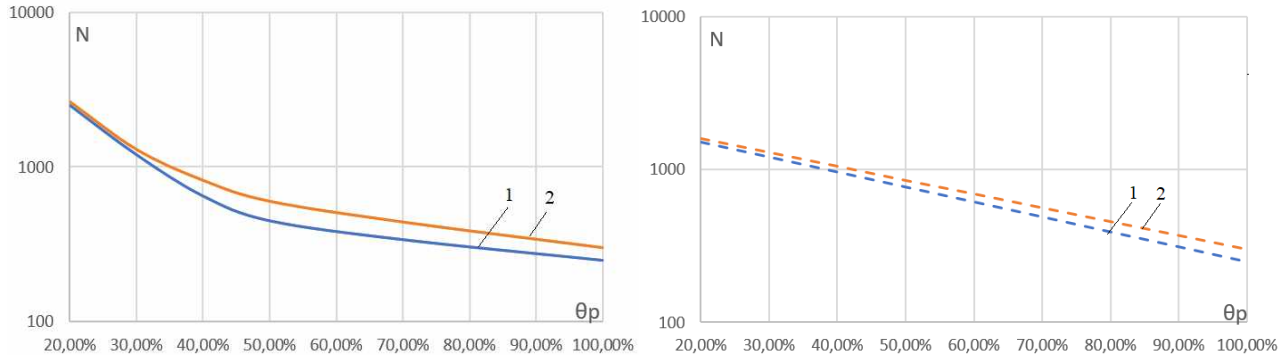
Таким образом, получены две зависимости (рис. 2, *а*), характеризующие диапазон срока службы различных типов герметичных свинцово-кислотных аккумуляторов, массово применяемых для источников бесперебойного питания.

Для сравнения полученных результатов используем справочную зависимость числа зарядно-разрядных циклов от глубины разряда [8]:

$$lgN_C = lgN_1 - b(1 - \theta_{\text{P}}) \quad (3)$$

где N_{C} – число циклов заряда-разряда; N_1 – число циклов при $\theta_{\text{P}} = 0$; b – эмпирический коэффициент равный -0,9…-0,97.

На основе приведенной формулы построены справочные зависимости и показаны на рис. 2, *б*.



а) *б*)

Рис. 2. Зависимости максимального количества циклов N_{C1678} (1), N_{C4} (2) от глубины разряда θ_{P}

Fig. 2. Dependencies of the maximum number of N_{C1678} (1), N_{C4} (2) cycles on the θ_{P} discharge depth

Модель влияния температуры на срок службы аккумуляторов

Одной из серьезных проблем, влияющих на ресурс герметизированных свинцово-кислотных аккумуляторов является отвод тепла, возникающего в результате реакции восстановления кислорода и реакции рекомбинации газов. Основными производителями герметичных аккумуляторов оценивается влияние температуры на количество циклов заряда-разряда относительно контрольной температуры 20 °С. При этом следует учитывать, что согласно закону Аррениуса свинцово-кислотные аккумуляторы, при повышении температуры свыше 20 °С, на каждые 10 °С снижают срок службы на 50 % [9]. Также указанная зависимость подтверждается экспериментальными данными от производителей аккумуляторных батарей. Для определения количества циклов N_T в зависимости от рабочей температуры T при интерполяции математической модели учтем значения представленные в табл. 2.

Процент числа циклов аккумуляторной батареи по сравнению с эталоном, измеренным при 20 °С, определяется уравнением:

$$N_{T\%} = \frac{N_{\theta T}}{N_{\theta 20^oC}} \quad (4)$$

где $N_{T\%}$ – число циклов аккумуляторной батареи в процентах; $N_{\theta T}$ – число циклов при температуре T; $N_{\theta 20^oC}$ – число циклов аккумуляторной батареи при температуре 20 °С.

Таблица 2

Зависимость количества циклов от температуры

Table 2

Number of cycles versus temperature

T, °C	20	25	30	40	50
N_T, %	100	71	50	25	12,5

С использованием экспоненциальной интерполяции на основе данных, полученных в табл. 2, синтезирована математическая модель, отражающая изменение количества циклов $N_{T\%}$ в зависимости от температуры T:

$$N_{T\%} = \begin{cases} 100 & 0<T\leq 20°C \\ 401{,}07e^{-0{,}069T} & T>20°C \end{cases} \quad (5)$$

Чтобы определить рабочую температуру аккумулятора используем следующее соотношение:

$$T = T_{\text{окр}} + \Delta T, \quad (6)$$

где $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды; ΔT – разница температур, связанная с внутренними тепловыми потерями P_T.

Связь между разницей температур ΔT и тепловыми потерями P_T определим, используя тепловую модель свинцово-кислотной аккумуляторной батареи, которая оценит потери тепла, вызванные внутренними и внешними воздействиями. Внешний нагрев связан с температурой окружающей среды, в то время как внутренние потери тепла зависят от омического сопротивления $R_{\text{Ʊ}}$ токопроводящих частей электродов, их активных масс и сопротивления электролита, а также поляризационного сопротивления $R_{\text{пол}}$, отражающего динамику электрохимических реакций аккумуляторной батареи [10].

Эквивалентная электрическая схема, приведенная на рис. 3, отражает тепловую модель, которая содержит тепловую емкость двойного слоя $C_{\text{дв}}$, тепловое сопротивление переноса заряда $R_{\text{о}}$ и источник тока с омическим сопротивлением R_{Ω}.

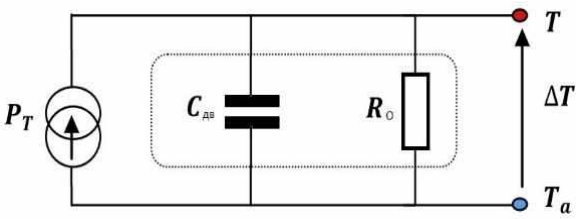


Рис. 3. Тепловая модель аккумуляторной батареи

Fig. 3. Thermal model of the battery

Тепловые потери рассчитываются, исходя из тока I в аккумуляторной батарее и внутреннего сопротивления $R_{\text{вн}}$:

$$P_T = R_{\text{вн}} I^2. \quad (7)$$

Зависимость внутреннего сопротивления от тока заряда-разряда, количества заряда и температуры имеет следующий вид [11]:

$$R_{\text{вн}}(T) = (R_1 + R_2 + R_3)(1 - \alpha_T \Delta T) = \left(\frac{k_1}{1+I^{k_2}} + \frac{k_3}{(1-Q/C_T)^{k_4}} + k_5\right)(1 - \alpha_T \Delta T), \quad (8)$$

где C_T – максимальная емкость АБ; Q – количество заряда, передаваемого в единицу времени; $k_1,\ k_2,\ k_3,\ k_4,\ k_5,\ \alpha_T$ – эмпирические постоянные; R_1, R_2 – сопротивления активных масс и сопротивления электролита, определяющие влияние зарядно-разрядного тока I и количества заряда Q на химическое состояние аккумулятора; $R_3 = k_5 = R_{\Omega}$ – омическое сопротивление.

Разница температур ΔT определяется тепловой моделью АБ (см. рис. 3):

$$\Delta T = Z_T P_T = Z_T R_{\text{вн}} I^2, \quad (9)$$

где Z_T – тепловой импеданс электрохимической системы [12], состоящий из тепловой емкости двойного слоя $C_{\text{дв}}$ параллельно с тепловым сопротивлением переноса заряда $R_{\text{о}}$.

Полученную тепловую модель интегрируем в модель старения аккумуляторной батареи и используем для оценки теплопередачи за счет проводимости и конвекции. Из-за сложности динамических процессов импеданс считаем постоянным во время циклов заряда-разряда [13, 14].

Обобщенная модель старения свинцово-кислотной аккумуляторной батареи

Объединив уравнения (1), (5) и (6), получим выражение зависимости максимального количества циклов $N_{\theta T}$ от глубины разряда $\theta_{\text{Р}}$ и температуры T:

$$N_{\theta T} = \begin{cases} \left(205{,}05\theta_{\text{Р}}^{-1{,}446}\right),\ 0 < T \leq 20°\text{C} \\ \left(205{,}05\theta_{\text{Р}}^{-1{,}446}\right)\left(401{,}07e^{-0{,}069T}\right), T > 20°\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

Как уже определили ранее – влияние температуры на процесс старения свинцово-кислотной аккумуляторной батареи в диапазоне 0 – 20 °С незначительно. Модель старения в данном случае соответствует зависимости (1). При $T > 20$ °С влиянием внутренней температуры можно пренебречь и максимальное количество циклов $N_{\theta T}$ получается путем перемножения правых частей уравнений (1) и (5).

Для определения скорости старения $R_{\text{Ст}\theta_K T_K}$ для каждого цикла k примем обратное значение максимального количества циклов (10):

$$R_{\text{Ст}\theta_K T_K} = \frac{1}{N_{\theta_K T_K}} \quad (11)$$

Таким образом, получена скорость старения, зависящая от глубины разряда и температуры (рис. 4).

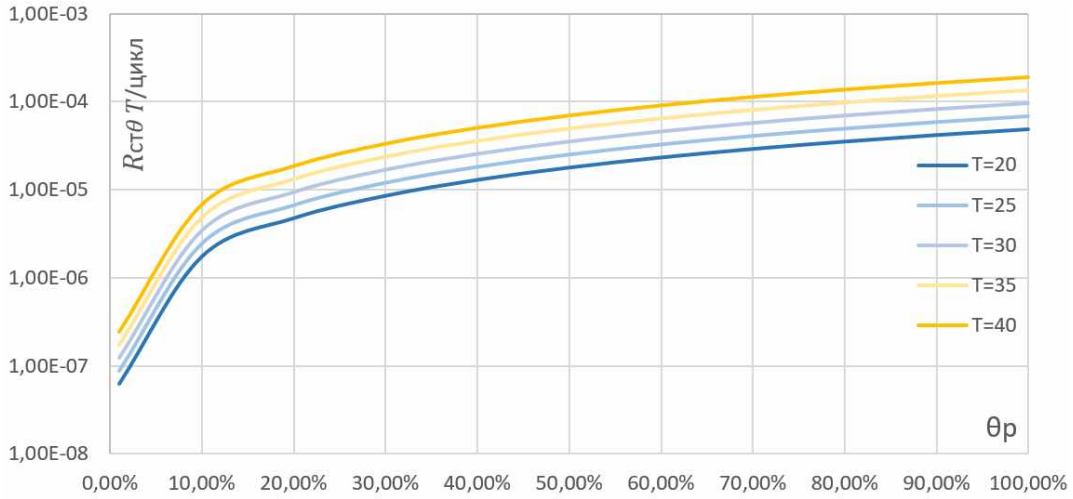


Рис. 4. Зависимость скорости старения $R_{\text{Ст}\theta_K T_K}$ за цикл от глубины разряда $\theta_{\text{Р}}$ и температуры T
Fig. 4. Dependence of aging rate $R_{\text{Ст}\theta_K T_K}$ per cycle on $\theta_{\text{Р}}$ discharge depth and temperature T

В период эксплуатации свинцово-кислотные аккумуляторные батареи с источниками бесперебойного питания работают с различными амплитудами разряда при различных температурах. Для определения скорости старения $R_{\text{Ст}}$ предлагается суммировать скорость старения каждого цикла $R_{\text{Ст}\theta_K T_K}$ для N циклов:

$$R_{\text{Ст}} = \sum_{k=1}^{N} R_{\text{Ст}\theta T}. \quad (12)$$

В случае приближения накопленной скорости старения к максимальному значению происходит завершение срока службы свинцово-кислотной аккумуляторной батареи.

Для практического использования разработанной методики необходимо предусмотреть систему мониторинга состояния аккумуляторной батареи, позволяющую определять количество циклов заряда-разряда, глубину разряда и ее температуру.

Заключение

В результате проведенного анализа установлено, что основную долю рынка аккумуляторных батарей для источников бесперебойного питания занимают свинцово-кислотной химические источники тока. При построении математических моделей с целью определения скорости старения и количества циклов аккумуляторных батарей необходимо использовать экспериментальные данные и/или данные, указанные в руководствах по эксплуатации от производителей. Для интерполяции дискретных данных применена степенная функция. Полученная обобщенная математическая модель скорости старения от глубины разряда и температуры позволяет на основе текущих данных систем мониторинга или телеметрии прогнозировать оставшееся количество циклов заряда-разряда до завершения срока службы различных герметизированных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей.

Список источников:

1. Космодамианский А.С., Баташов С.И., Николаев Е.В. Разработка устройств предотвращения боксования локомотива на основе объектного моделирования технических решений // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №. 4. С. 79-86. DOI: https://doi.org/10.30987/2658-6436-2022-4-79-86

2. Морозов С.В., Андриянов А.И. Моделирование режима одностороннего включения линии электропередачи сверхвысокого напряжения с применением устройства синхронизации моментов включения контактов фаз выключателя // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №. 2. С. 89-96. DOI: https://doi.org/10.30987/2658-6436-2023-2-89-96

3. Чернов М.Б., Голубков А.В. Компьютерное моделирование динамики состояния заряда (SOC) электрических аккумуляторов // Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. 2023. № 1. С. 171-179.

4. Карамов Д.Н., Муфтахов И.Р., Потапов В.В., Сыромятников А.А., Шушпанов И.Н. Универсальная модель срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 2(26). – С. 85-96. – DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.008.

5. Добрего К.В., Бладыко Ю.В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 1. С. 27-39. https://doi.org/10. 21122/1029-7448-2021-64-1-27-39/

6. Фоменко Н.С., Григорьев А.С., Данисилов А.С. Особенности моделирования свинцово-кислотного аккумулятора // Электрохимическая энергетика. 2019. Т. 19 (2). С. 81-89. https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89.

7. Sauer D.U., Wenzl H. Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems-using lead-acid batteries as example. J. Power Sources 176 (2008). Pp. 534-546.

8. Коровина Н.В., Скундина А.М. Химические источники тока: Справочник // М.: Издательство МЭИ, 2003. С. 267.

9. Classic-Handbook for Stationary Vented Lead–Acid Batteries Part 2, Installation, Commissioning and Operation, Industrial Power, Application Engineering, GNB a division of Exide Technologies, Edition 4, January 2012.

References:

1. Kosmodamianskiy A.S., Batashov S.I., Nikolaev E.V. Development of locomotive skid prevention devices based on object modeling of technical solutions // Automation and modeling in design and management. 2022;4:79-86. DOI: https://doi.org/10.30987/2658-6436-2022-4-79-86

2. Morozov S.V., Andriyanov A.I. Simulating the mode of one-sided switching-on of an ultra-high voltage power line using a device for synchronizing the moments of switching-on the contacts of the circuit breaker phases // Automation and modeling in design and management. 2023;2:89-96. DOI: https://doi.org/10.30987/2658-6436-2023-2-89-96

3. Chernov M.B., Golubkov A.V. Computer simulation of the State of Charge (SOC) dynamics of electric batteries // Scientific letters of UlSU. Math and information technologies. 2023;1:171-179.

4. Karamov D.N., Muftahov I.R., Potapov V.V., SyromyatnikovA.A., Shushpanov I.N. Methofology for calculating the lifetime of storage batteries in autonomous photovoltaic systems // Information and mathematical technologies in science and management. 2022;2(26):85-96. DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.008.

5. Dobrego K.V., Bladyko Y.V. Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters. Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. 2021. 64 (1):27-39. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39/

6. Fomenko N.S., Grigoryev A.S., Dinisilov A.S. Specific Features of Lead-Acid Battery Modelling. Electrochemical Energetics, 2019;19(2):81-89. https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89.

7. Sauer D.U., Wenzl H. Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems-using lead-acid batteries as example. J. Power Sources. 2008;176(2):534-546.

8. Korovina N.V., Skundina A.M. Chemical current sources: Reference book // M.: MPEI Publishing House, 2003.

9. Classic-Handbook for Stationary Vented Lead–Acid Batteries Part 2, Installation, Commissioning and Operation, Industrial Power, Application Engineering, GNB a division of Exide Technologies, Edition 4, January 2012.

10. Таганова А.А., Бубнов Ю.И., Орлов С. Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: Справочник // СПб.: ХИМИЗДАТ, 2005. С.217.

11. Copetti J.B., Chenlo F. Lead/acid batteries for photovoltaic applications: test results and modeling. J. Power Sources 47 (1994). Pp. 109-118.

12. Стоинов З.Б., Графов Б.М., Савова-Стойнова Б. и др. Электрохимический импеданс. М.: Наука. 1991. С. 336.

13. Layadi T.M., Mostefai M., Champenois G., Abbes D. Dimensioning a hybrid electrification system 11. (PV/WT/DG/battery) using a dynamic simulator. International Conference on Electrical Engineering and Software Applications conference (ICEESA), 21-23 March 2013, Tunisia.

14. Layadi T.M., Champenois G., Mostefai M., Abbes D. Etude du vieillissement d'un banc de stockage plomb-acide dans un système hybride multi-sources, in: Symposium de Génie électrique (SGE'14), 8–10 juillet March 2014, France.

10. Taganova A.A., Bubnov Yu.I., Orlov S. B. Hermetic chemical current sources: Elements and akku-mulators. Equipment for testing and operation: Handbook //St. Petersburg: HIMIZDAT, 2005.

11. Copetti J.B., Chenlo F. Lead/acid batteries for photovoltaic applications: test results and modeling. J. Power Sources. 1994; 47:109-118.

12. Stoinov Z.B., Grafov B., Savova-Stoinova B., etc. Electrochemical impedance. M.: Science. 1991.

13. Layadi T.M., Mostefai M., Champenois G., Abbes D. Dimensioning a hybrid electrification system 11. (PV/WT/DG/battery) using a dynamic simulator. International Conference on Electrical Engineering and Software Applications conference (ICEESA), 21-23 March 2013, Tunisia.

14. Layadi T.M., Champenois G., Mostefai M., Abbes D. Study of the aging of a lead-acid storage bench in a hybrid multi-source system, in: Symposium of Electrical Engineering (SGE'14), 8-10 july March 2014, France.

Информация об авторах:

Сиротский Максим Сергеевич
аспирант кафедры «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета

Пугачев Александр Анатольевич
доктор технических наук, заведующий кафедрой «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета

Information about the authors:

Sirotskiy Maksim Sergeevich
Postgraduate Student of the Department «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

Pugachev Alexander Anatolievich
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department «Turbine Engineering, Electric and Thermal Power Engineering» of Bryansk State Technical University

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.02.2024; одобрена после рецензирования 28.02.2024; принята к публикации 03.03.2024.

The article was submitted 10.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024; accepted for publication 03.03.2024.

Рецензент – Космодамианский А.С., доктор технических наук, профессор, Российский университет транспорта.

Reviewer – Kosmodamianskiy A.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Russian University of Transport.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»
Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-pu@mail.ru
Вёрстка А.Г. Малаханова. Редактор Д.А. Петраченкова.
Сдано в набор 15.03.2024. Выход в свет 29.03.2024.
Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,23.
Тираж 500 экз. Свободная цена.
Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»
241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+