

ИЗМЕНЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТАРТЕРНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

А. В. Пузаков

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия
e-mail: and-rew78@yandex.ru

Аннотация. Одной из наиболее распространённых причин отказов автомобилей в нашей стране и за рубежом является выход из строя аккумуляторной батареи. Основной причиной этого является отсутствие информации об изменении технического состояния батареи, вследствие чего её дефекты (включая разряженность) являются внезапными, что влечёт за собой социальный и экономический ущерб. Информирование водителя о степени заряженности батареи лишь частично устраняет проблему, поскольку данный параметр не в полной мере отражает состояние работоспособности батареи. Решением данной задачи может стать система мониторинга технического состояния батареи, основанная на оценке изменения напряжения батареи в режиме реального времени. Целью работы является установление взаимосвязи между напряжением батареи и степенью её работоспособности при моделировании характерных неисправностей. Анализ публикаций позволил установить, что к числу часто встречающихся неисправностей можно отнести: снижение заряженности, сульфатацию пластин, окисление полюсных выводов и короткие замыкания. Для получения информации об изменении параметров аккумуляторной батареи в процессе возникновения и развития неисправностей разработаны методы их моделирования. Изменение работоспособности батарей вследствие старения или неисправностей можно оценить на основе напряжения на её выводах при воздействии нагрузки, в качестве которой выступает стартерный электродвигатель в режиме полного торможения. Установлено изменение напряжения при воздействии нагрузки в течение 5 секунд для новой батареи, батарей с вариацией наработки, а также при моделировании разряженности, окисления полюсных выводов и сульфатации пластин. Работоспособность батарей определена двумя способами: по показаниям тестера, использующего для расчётов силу тока батареи, и вычислительным – по минимальному значению напряжения в процессе нагружения. Установлено, что степень работоспособности исправных работавших и неисправных аккумуляторных батарей при одинаковом напряжении существенно различается, что может быть использовано для идентификации технического состояния стартерных батарей. Научной новизной обладают установленные взаимосвязи между напряжением батареи и степенью её работоспособности при физическом моделировании характерных неисправностей. Дальнейшие исследования направлены на разработку алгоритма оперативного мониторинга батарей и изготовление опытного образца бортового устройства для его реализации.

Ключевые слова: стартерная аккумуляторная батарея, моделирование неисправностей, нагрузочный режим, степень заряженности, степень работоспособности.

Для цитирования: Пузаков А. В. Изменение работоспособности стартерных аккумуляторных батарей при моделировании неисправностей // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 6. – С. 113–123, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-6-113>.

CHANGE OF THE STARTER BATTERY OPERABILITY IN MODELING FAILURES

A. V. Puzakov

Orenburg State University, Orenburg, Russia
e-mail: and-rew78@yandex.ru

Abstract. One of the most common causes of vehicle failures in our country and abroad is battery failure. The main reason for this is a lack of information about changes in the technical condition of the battery, which makes battery faults (including low charge) sudden, causing social and economic damage. Informing the driver of the battery's state of charge only partially solves the problem, as this parameter does not fully reflect the battery's state of health. A solution to this problem could be a battery condition monitoring system based on real-time assessment of battery voltage variations. The purpose of this work is to establish the relationship between the battery voltage and the degree of battery performance in the simulation of characteristic faults. Analysis of

publications has established that among the most common faults are decrease of charge, sulphation of plates, oxidation of pole terminals and short circuits. To obtain information about changes in battery parameters in the process of occurrence and development of faults simulation methods have been developed. Changes in battery performance due to ageing or faults can be estimated based on the voltage at its terminals under the influence of the load, which is the starter motor in full braking mode. The change of voltage under load for 5 seconds is determined for new batteries, batteries with running hours variation as well as for simulated discharging, oxidation of the terminals and sulphation of the plates. The serviceability of batteries is determined in two ways: by a tester using the battery current for calculations and computationally using the minimum voltage during the loading process. It was found that the state of health of serviceable working and faulty batteries at the same voltage differs significantly, which can be used to identify the technical condition of starter batteries. The established relationships between the battery voltage and the state of health in the physical simulation of characteristic faults have scientific novelty. Further research is aimed at developing an algorithm for on-line monitoring of batteries and manufacturing a prototype on-board device for its implementation.

Key words: starter battery, state of charge, state of health, loading mode, fault simulation.

Cite as: Puzakov, A. V. (2022) [Change of the starter battery operability in modeling failures]. *Intellect. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 6, pp. 113–122, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-6-113>.

Введение

Неисправности аккумуляторной батареи определяются водителем по косвенным признакам, так как автомобиль не оснащён приборами диагностирования её технического состояния. Это снижает эффективность эксплуатации автомобилей, так как

замена или заряд аккумуляторной батареи сопровождаются временными и материальными затратами. Учитывая значительную долю отказов, связанных с батареями (рисунок 1), определение технического состояния аккумуляторной батареи на борту автомобиля является актуальной задачей.

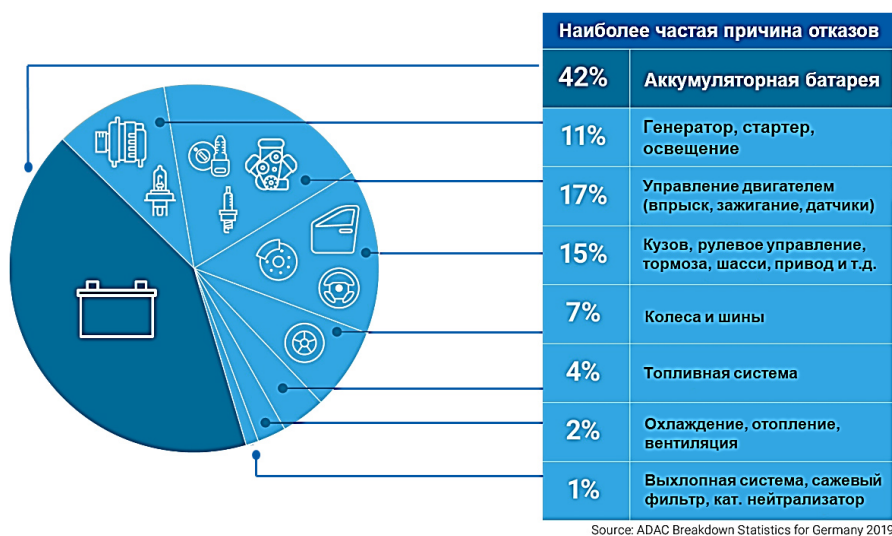


Рисунок 1. Распределение причин отказов легковых автомобилей

Источник: ADAC Breakdown Statistics for Germany 2019

При эксплуатации аккумуляторной батареи происходит изменение её структурных (внутреннее сопротивление) и диагностических (ток и напряжение) параметров, динамика снижения которых обусловлена процессами естественного износа или возникновения неисправностей [2, 3].

Рассмотрим возможные причины неисправностей аккумуляторных батарей. В диссертации Геврасёва И. Ф. «Разработка метода эффективного

использования аккумуляторных батарей на автотранспортных предприятиях» приводится следующий анализ причин отказов батарей (таблица 1).

В книге Kirby W. Beard «Handbook of batteries» приведена статистика распределения причин отказов аккумуляторных батарей (рисунок 2).

В диссертации нидерландского исследователя J. Otjens также выполнен анализ отказов аккумуляторных батарей (рисунок 3).

Таблица 1. Анализ причин отказов батарей

Причина отказа батареи	Процент отказавших батарей, %
Разрушение решёток положительных электродов	28–31,5
Оплывание активной массы отрицательных электродов и разрушение положительных электродов	18,8–23,6
Разряженность батареи	12,5–14,6
Оплывание активной массы отрицательных электродов	8,7–8,9
Оплывание активной массы положительных электродов	9,2–10,7
Прочие	8–12,2

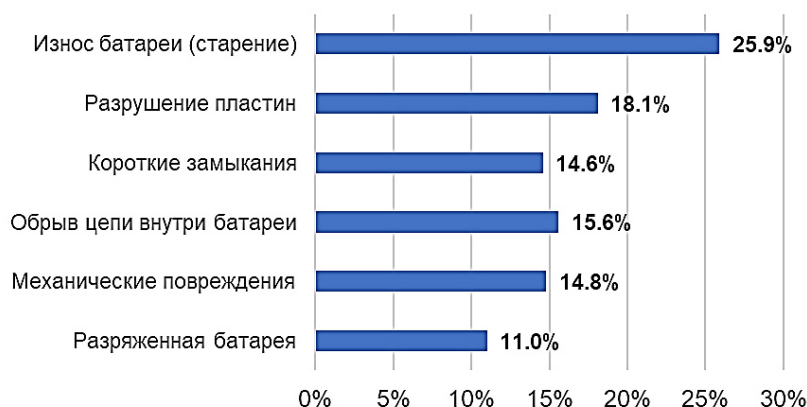


Рисунок 2. Характер отказа списанных батарей
Источник: Kirby W. Beard «Handbook of batteries»

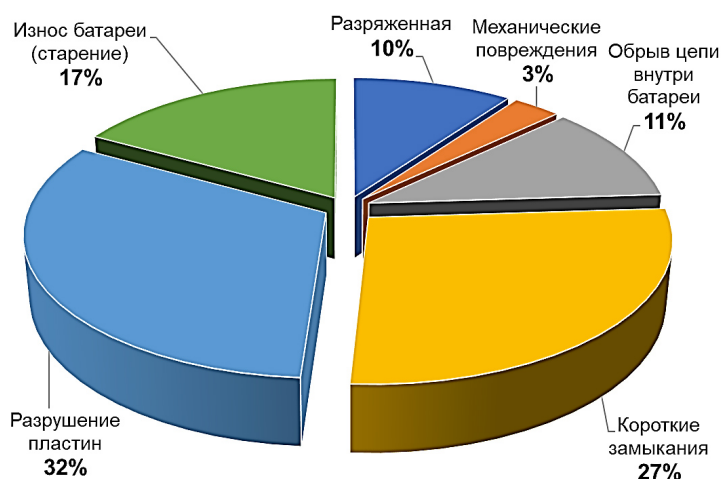


Рисунок 3. Виды отказов аккумуляторных батарей

Источник: Otjens J. «A battery's heartbeat: How to estimate the state of health of an online battery by use of non-invasive measuring methods.», 2017

Анализ этих и других публикаций [1, 9, 17, 18, 19] показал, что к основным неисправностям аккумуляторных батарей относят: снижение степени заряженности, окисление полюсных выводов,

разрушение активной массы, короткое замыкание, сульфатация пластин, ускоренный саморазряд, обрыв цепи внутри батареи.

Для получения информации об изменении пара-

метров аккумуляторной батареи в процессе возникновения и развития неисправностей разработаны методы их моделирования, подробно рассмотренные в [16]. Целью работы является установление взаимосвязи между напряжением батареи и степенью её работоспособности при физическом моде-

лировании характерных неисправностей.

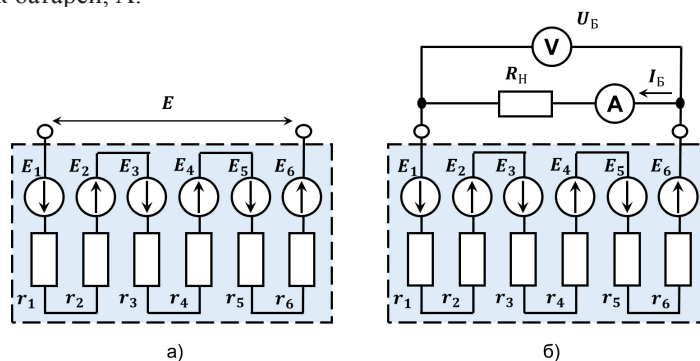
Методика исследования

При отсутствии нагрузки выходные параметры стартерной аккумуляторной батареи (рисунок 4) описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} E = \sum_{i=1}^n E_i \\ r_b = \sum_{i=1}^n r_i, \\ I_b = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где

- E – электродвижущая сила (напряжение без нагрузки) батареи, В;
- E_i – электродвижущая сила (напряжение без нагрузки) аккумулятора, В;
- n – количество аккумуляторов в батарее;
- r_b – внутреннее сопротивление батареи, Ом;
- r_i – внутреннее сопротивление аккумулятора, Ом;
- I_b – разрядный ток батареи, А.



а) без нагрузки; б) при подключении нагрузки

Рисунок 4. Выходные параметры аккумуляторной батареи
Источник: разработано автором

При подключении нагрузки аккумуляторная батарея начинает вырабатывать электрический ток, величина которого определяется законом Ома для

полной электрической цепи. Напряжение на выводах аккумуляторной батареи снижается:

$$\begin{cases} I_b = \frac{E}{R_H + r_b} \\ U_b = E - I_b \cdot (R_H + r_b) \end{cases} \quad (2)$$

где

R_H – электрическое сопротивление нагрузки, Ом.

Изменение работоспособности аккумуляторных батарей вследствие старения или неисправностей можно оценить на основе напряжения на её выводах при воздействии нагрузки [5]. В работах [8,

13, 14] в качестве такой нагрузки выступает стартерный электродвигатель при пуске автомобильного двигателя. Степень работоспособности батареи (State of Health, SOH):

$$SOH = \frac{U_{cr} - U_1}{U_{new} - U_1} \quad (3)$$

где

SOH – степень работоспособности батареи;

U_{cr} – текущее значение напряжения батареи при запуске двигателя, В;
 U_{new} – максимальное значение напряжения при запуске двигателя с помощью новой батареи, В;
 U_1 – минимально допустимое напряжение, достаточное для запуска двигателя, В.

В лабораторных условиях такой режим работы обеспечить сложно. Наиболее близкой к нему является работа стартерного электродвигателя в режиме полного торможения (короткого замыкания), существующего непродолжительное время при пуске автомобильного двигателя [7].

Снижение степени заряженности аккумуляторной батареи чаще всего возникает из-за несоблюдения баланса электроэнергии на автомобиле. Иными словами, аккумуляторная батарея не успевает вос-

становить энергию, затраченную на запуск двигателя [2, 4]. Также снижение заряженности может возникать из-за большого числа потребителей или неисправности генератора. Снижение заряженности характеризуется снижением напряжения на выводах батареи, что приводит к возможным перебоям в работе потребителей.

Степень заряженности аккумуляторной батареи можно определить по формуле [6, 11, 12, 15]

$$SOC = \frac{U_i - U_{min}}{U_{max} - U_{min}}, \quad (4)$$

где

SOC – степень заряженности батареи;
 U_i – текущее напряжение на выводах, В;
 U_{max} – напряжение полностью заряженной батареи, В;
 U_{min} – напряжение полностью разряженной батареи, В.

Для получения необходимых значений SOC , аккумуляторная батарея принудительно разряжалась до значений напряжения, соответственно равных 12,46 и 12,31 В. Эти напряжения соответствуют $SOC = 75\%$ и $SOC = 50\%$. На автомобиле не допускается эксплуатация аккумуляторных батарей, заряженных менее чем на 50%. Полностью заряженная аккумуляторная батарея имела напряжение, равное 12,72 В.

Окисление полюсных выводов может возникнуть из-за несоблюдения правил обслуживания аккумуляторной батареи. Такая неисправность может

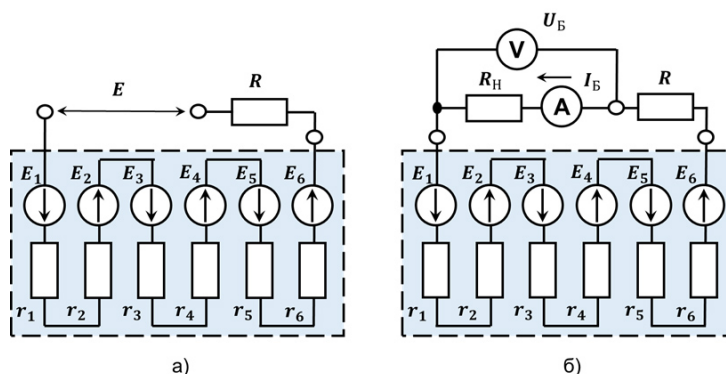
характеризоваться уменьшением тока, как отдаваемого, так и принимаемого батареями вследствие повышения сопротивления в её цепи.

Для моделирования окисления полюсных выводов последовательно с батареей подключается активное электрическое сопротивление. В режиме нагружения в этом случае уменьшается разрядный ток и напряжение на выводах батареи вследствие падения напряжения на резисторе (рисунок 5). Напряжение и ток аккумуляторной батареи снижается:

$$\begin{cases} I_b = \frac{E}{R_H + r + R} \\ U_b = E - I_b \cdot (R_H + r + R) \end{cases}, \quad (5)$$

где

R – дополнительное электрическое сопротивление, Ом.



а) без нагрузки; б) при подключении нагрузки

Рисунок 5. Выходные параметры батареи при моделировании окисления полюсных выводов
 Источник: разработано автором

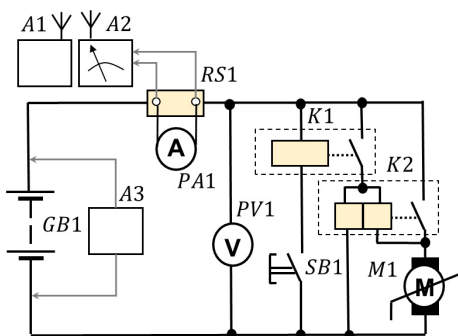
Из-за образования на поверхности пластин кристаллов сернистого свинца уменьшается их активная площадь [10]. Смоделировать это можно снижением уровня электролита ниже верхнего края пластин. Оголённая часть пластин при этом покрывается сульфатом свинца $PbSO_4$.

Эксперимент проводился в следующем порядке. В боковой поверхности аккумуляторной батареи высверливались отверстия для слива электролита. На первом этапе отверстия сверлились на 1/2 высоты пластины соответственно в одном, трёх и шести аккумуляторах. Затем отверстия выполнялись на 1/5 высоты пластины в трёх и шести аккумуляторах. Таким образом были исследованы пять стадий развития сульфатации.

Результаты исследования

Порядок проведения испытания на специализированном стенде следующий: к выводам батареи подключаются измерительные приборы (цифровые мультиметры OWON B41t+ с возможностью фиксации результатов на смартфоне) для записи показаний разрядного тока и напряжения батареи (рисунок 6). Далее, нажатие кнопки SB1 подаёт питание на дистанционный выключатель «массы» K1, который обеспечивает работу тягового реле стартера K2, подключающего стартерный электродвигатель к батарее.

Длительность нагружения по условиям эксплуатации стартерного электродвигателя не должна превышать 5 секунд.



A1 – смартфон; A2, A3 – мультиметр OWON B41t+; GB1 – стартерная аккумуляторная батарея 6СТ-60L; K1 – дистанционный выключатель массы; K2 – тяговое реле стартера; M1 – стартерный электродвигатель 2120-3708010; PA1 – амперметр; PV1 – вольтметр; RS1 – токовый шунт 75 мВ 1000 А; SB1 – пусковая кнопка

Рисунок 6 Электрическая схема испытаний

Источник: разработано автором

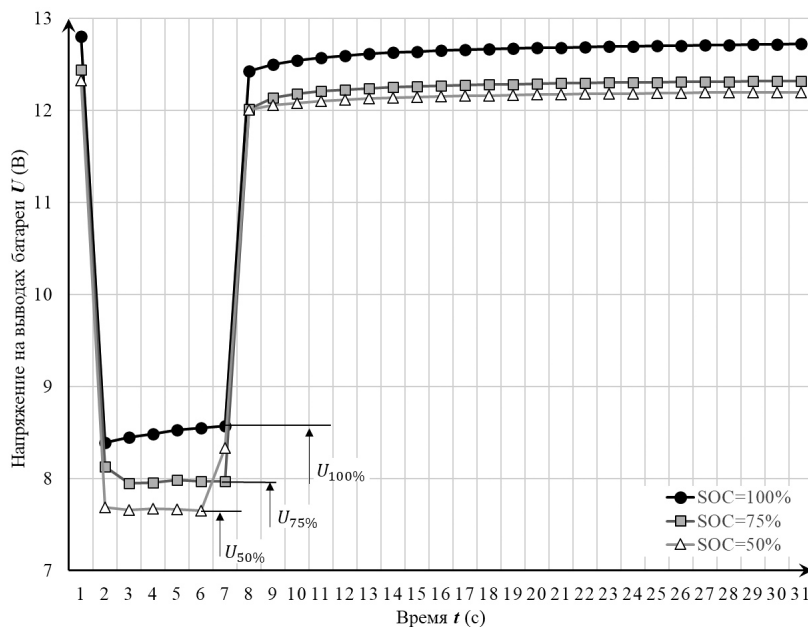


Рисунок 7. Изменение напряжения батареи при снижении заряженности

Источник: получено и обработано автором

В качестве объекта исследования при моделировании неисправностей использовались аккумуляторные батареи Tyumen Battery Standard 6СТ-60L номинальной ёмкостью 60 А·ч. Использованы четыре батареи из одной партии, внутреннее сопротивление и степень работоспособности которых совпадали. При исследовании влияния наработки протестированы 12 батарей одной номинальной ёмкости (60 А·ч) разных производителей, предварительно полностью заряженные.

Снижение степени заряженности. Как следует

из рисунка 7, напряжение в конце режима нагружения слабо изменяется при снижении заряженности батареи. Снижение заряженности до величины $SOC = 50\%$ вызвало уменьшение напряжения при нагружении всего на 10%. Следовательно, при штатной эксплуатации аккумуляторной батареи на автомобиле снижение заряженности не ухудшит её пусковых свойств. Однако это характерно только для относительно новой аккумуляторной батареи, так как при старении её свойства ухудшаются даже при $SOC = 100\%$ (рисунок 8).

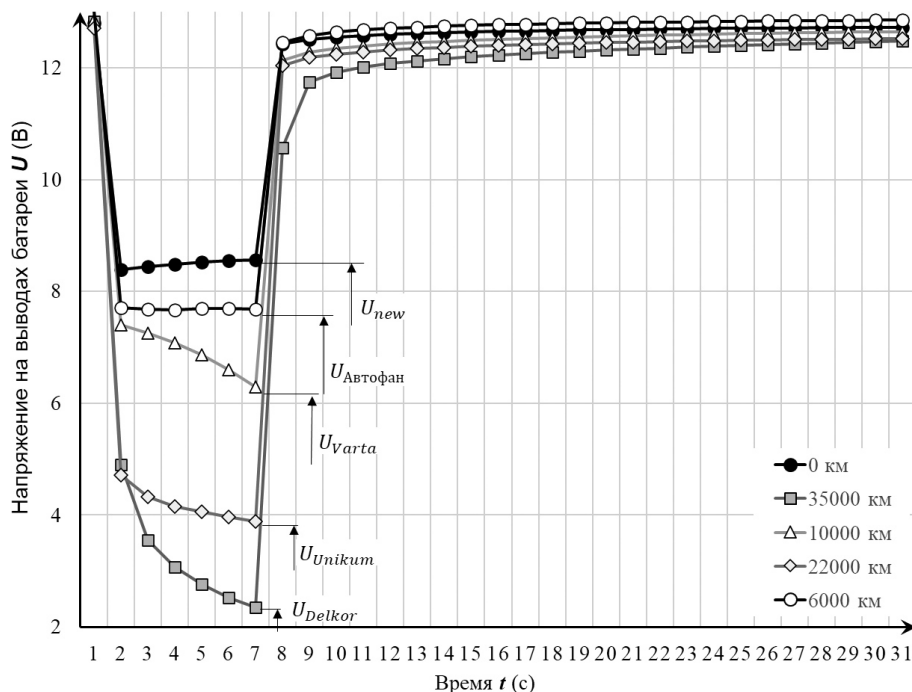


Рисунок 8. Изменение напряжения батареи при старении

Источник: получено и обработано автором

Увеличение срока эксплуатации до 8 лет ($L = 35000$ км) вызвало снижение напряжения при нагружении на 72%.

Окисление полюсных выводов. Дополнительный резистор, включаемый последовательно с батареей, выполнен из тугоплавкого материала (элемент нагрузочной вилки), выдерживающего достаточно длительную нагрузку большим током. Тестирование проводилось для сопротивления резистора 11,5 мОм, 20 мОм и 40 мОм.

На рисунке 9 приведены результаты эксперимента. Окисление полюсных выводов приводит к снижению напряжения батареи, что сказывается на пусковых свойствах. Также данная неисправность затрудняет процесс восполнения заряда от генератора.

Сульфатация пластин. Результаты эксперимента по моделированию сульфатации представлены на рисунке 10. Уменьшение активной площади

пластин аккумуляторной батареи до 20% от номинальной (стадия 5) привело к снижению напряжения всего на 20%.

Обсуждение результатов

Подставляя значения напряжения нагрузочного режима, установленные экспериментально при моделировании неисправностей аккумуляторной батареи, в формулу (3), получим степень работоспособности SOH . Зависимость между напряжением и степенью работоспособности показана на рисунке 11, на котором светлыми маркерами выделены результаты расчёта по формуле (3), на основании которых построена линия тренда.

Также на рисунке 11 тёмными маркерами отмечены результаты нахождения степени работоспособности SOH с помощью тестера ICartool IC-110. Для определения SOH в тестере используется следующее выражение:

$$SOH = \left(\frac{I_i}{I_{CCA}} \right)^2, \tag{6}$$

где

SOH – степень работоспособности, в долях единицы,

I_i – текущее значение тока батареи, А.

I_{CCA} – ток холодного пуска, А.

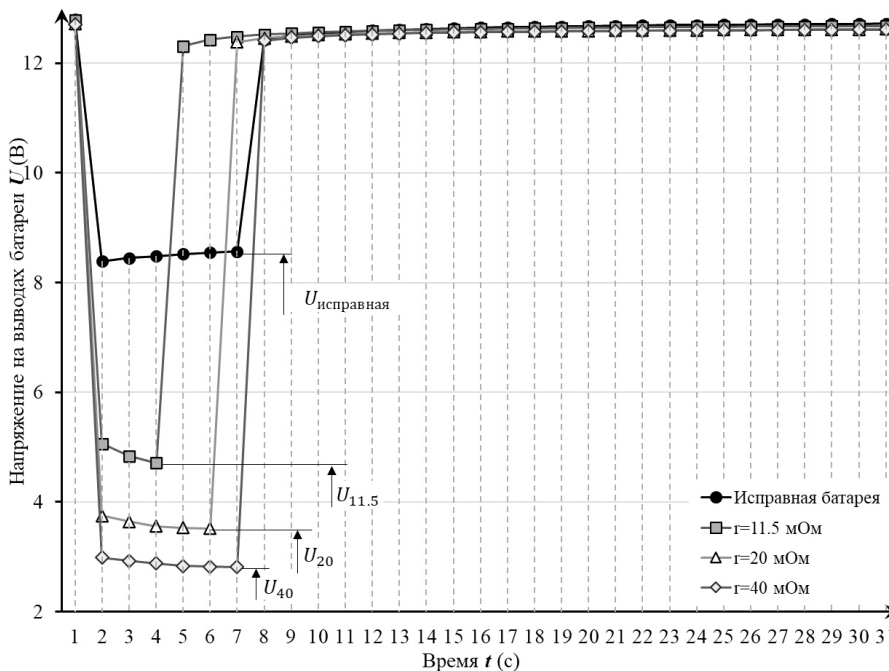


Рисунок 9. Изменение напряжения батареи при моделировании окисления полюсных выводов
 Источник: получено и обработано автором

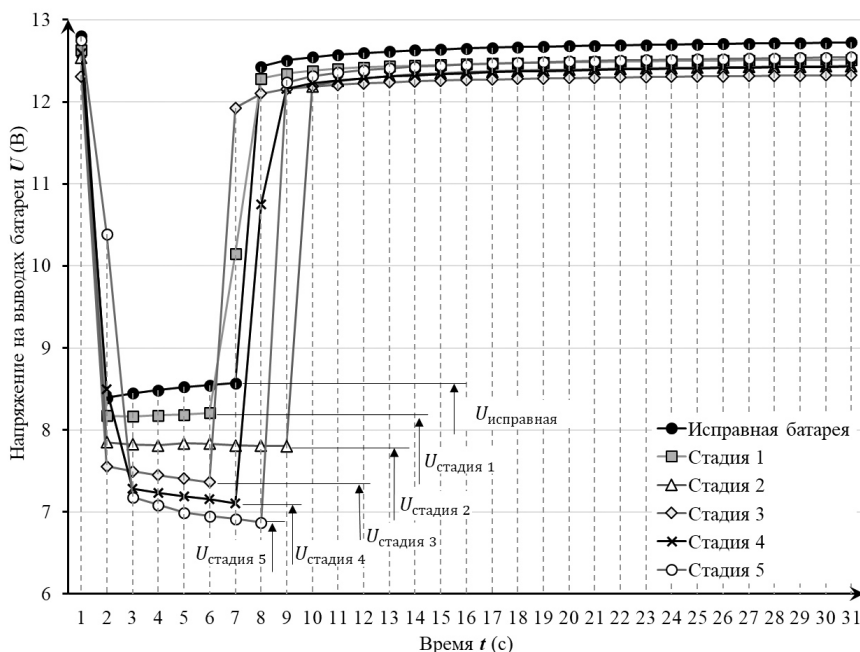


Рисунок 10. Изменение напряжения батареи при моделировании сульфатации пластин
 Источник: получено и обработано автором

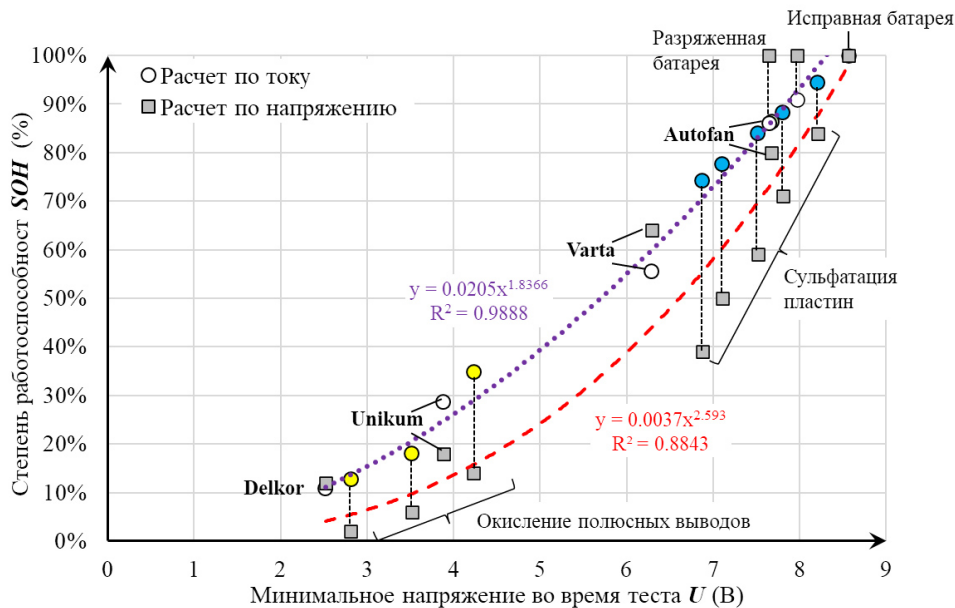


Рисунок 11. Результаты изменения степени работоспособности аккумуляторной батареи при моделировании неисправностей

Источник: разработано автором

Анализируя положение маркеров можно сделать следующие выводы:

- результаты эксперимента и данные тестера сходятся для исправной (новой) батареи и заряженных батарей с разной величиной наработки;
- значения работоспособности, полученные при моделировании неисправностей, существенно различаются, что объясняется тем, что в тестере используется величина тока, а в формуле (3) – величина напряжения батареи.

Таким образом, расчёт по формуле (3) даёт заниженные значения для неисправных батарей, по сравнению с исправными работавшими, и эта разность может быть использована на практике при реализации бортового мониторинга аккумуляторных батарей. Раннее обнаружение неисправностей может устранить недозаряд батарей в случае окисления полюсных выводов и предотвратить развитие процесса сульфатации пластин путём длительного заряда малым током.

Заключение

Изменение работоспособности батарей вследст-

вие старения или неисправностей можно оценить на основе напряжения на её выводах при воздействии нагрузки, в качестве которой выступает стартерный электродвигатель в режиме полного торможения. Установлено изменение напряжения при воздействии нагрузки в течение 5 секунд для новой батареи, батарей с вариацией наработки, а также при моделировании разряженности, окисления полюсных выводов и сульфатации пластин.

Работоспособность батарей определена двумя способами: по показаниям тестера, использующего для расчётов силу тока батареи, и вычислительным – по минимальному значению напряжения в процессе нагружения. Установлено, что отклонение значений работоспособности однозначно указывает на неисправность батареи и обладает научной ценностью. Практическая значимость работы заключается в использовании полученных результатов для идентификации технического состояния стартерных батарей.

Дальнейшие исследования направлены на разработку алгоритма оперативного мониторинга батарей и изготовление опытного образца бортового устройства для его реализации.

Литература

1. Воронов А. Н. Экспресс-метод определения неисправности свинцово-кислотной аккумуляторной батареи // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2018. – № 1–2. – С. 51–54. EDN: YQAXOZ.
2. Захаров Н. С., Сапоженков Н. О. Методика корректирования периодичности заряда автомобильных аккумуляторных батарей в зимний период: монография. – Тюмень: ТИУ, 2018. – 157 с.
3. Кочуров А. А., Гумелёв В. Ю., Шевченко Н. П. Теоретические основы решения проблемы увеличения сроков службы аккумуляторных батарей при хранении и повышения эффективности способов их вос-

становления: монография; под общ. ред. А. А. Кочурова. – Рязань: Ряз. высш. возд.-дес. ком. уч-ще (воен. ин-т), 2012. – 252 с.

4. Кочуров А. А., Постников А. А., Гумелёв В. Ю. Методика оценки степени разряженности свинцовых аккумуляторов в эксплуатации // *Современные научные исследования и инновации*. – 2016. – № 6(62). – С. 231–237. EDN: WFRFZZ.

5. Постников А. А., Юров Ю. Ю., Гумелев В. Ю. Оценка и выбор параметров для контроля технического состояния аккумуляторных батарей // *Научный резерв*. – 2018. – № 1 (1). – С. 54–59. EDN: LZGFQL.

6. Пузаков А. В., Калимуллин Р. Ф., Смирнов Д. А. Моделирование параметров технического состояния стартерных аккумуляторных батарей // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2021. – № 1. – С. 9–13. EDN: IGOGJN.

7. Пузаков А. В., Смирнов Д. А. Разработка нагрузочного режима стартерной аккумуляторной батареи // *Грузовик*. – 2020. – № 11. – С. 30–34. EDN: JSADOL.

8. Смирнов Д. А. Оценка технического состояния стартерной аккумуляторной батареи // *Шаг в науку*. – 2021. – № 4. – С. 68–73. EDN: OJSHAV.

9. Brik K. and Ammar F. (2008) The Fault tree analysis of the lead acid battery's degradation. *Journal of Electrical Systems*. Vol. 4. No 2, pp. 145–159.

10. Catherino H., Feres F. and Trinidad F. (2004) Sulfation in lead–acid batteries. *Journal of Power Sources*. Vol. 129. Is 1, pp. 113–120, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.11.003>.

11. Danko M. et al. (2019) Overview of batteries State of Charge estimation methods. *Transportation Research Procedia*. Vol. 40, pp. 186–192, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.029>.

12. Kataoka T. et al. (2019) Battery State Estimation System for Automobiles. *Sei Technical Review*. No 88. pp. 55–58.

13. Kerley R., Hyun J. H., and Ha D. S. (2015) Automotive lead-acid battery state-of-health monitoring system. *41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 003934–003938, <https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392714>.

14. Micea M. V. et al. (2011) Online State-of-Health Assessment for Battery Management Systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. vol. 60. No 6, pp. 1997–2006, <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2115630>.

15. Prasad V. and Divakar B. (2018) Real Time Estimation of SOC and SOH of Batteries. *International Journal of Renewable Energy Research*. Vol. 8, No 1. pp. 44–55. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v8i1.6536.g7279>.

16. Puzakov A. and Smirnov D. (2020) Physical simulation of the faults of starter batteries, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Vol. 971 pp. 052066, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/5/052066>.

17. Schwimmbeck S. et al. (2019) Modeling the Dynamic Behavior of 12V AGM Batteries and Its Degradation, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952242>.

18. Yahmadi R., Brik K. and Ammar F. (2016) Failures analysis and improvement lifetime of lead acid battery in different applications. *Proceedings of Engineering & Technology (PET)*, pp. 148–154.

19. Zhang S. N. et al. (2013) The Failure Analysis and Countermeasures of Starter Battery, *Advanced Materials Research*, Vol. 805–806, pp. 515–518, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.805-806.515>.

References

1. Voronov, A. N. (2018) [Express method for determining the malfunction of a lead-acid battery]. *Selskhozyaistvennaya tehnika obsluzhivanie i remont* [Agricultural machinery: maintenance and repair]. Vol. 1–2, pp. 51–54. (In Russ.).

2. Zakharov, N. S., Sapozhenkov, N. O. (2018) *Metodika korrektsirovaniya periodichnosti zaryada avtomobil'nykh akkumulyatornykh batarey v zimniy period: monografiya* [Methodology for correcting the frequency of charging car batteries in winter: monograph]. Tyumen Industrial University, 157 p. (In Russ.).

3. Kochurov, A. A., Gumelev, V. Yu., Shevchenko, N. P. (2012) *Teoreticheskiye osnovy resheniya problemy uvelicheniya srokov sluzhby akkumulyatornykh batarey pri khranении i povysheniya effektivnosti sposobov ikh vosstanovleniya: monografiya* [Theoretical foundations for solving the problem of increasing the service life of batteries during storage and improving the efficiency of methods for their recovery: monograph]. under total ed. A. A. Kochurova. Ryazan Higher Airborne Command School (military institute), 252 p. (In Russ.).

4. Kochurov, A. A., Postnikov, A. A., Gumelev, V. Yu. (2016) [Methodology for assessing the degree of discharge of lead batteries in operation]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific research and innovation]. Vol. 6(62), pp. 231–237. (In Russ.).

5. Postnikov, A. A., Yurov, Yu. Yu., Gumelev, V. Yu. (2018) [Evaluation and selection of parameters for monitoring the technical condition of batteries]. *Nauchnii rezerv* [Scientific reserve]. Vol. 1(1), pp. 54–59. (In Russ.).

6. Puzakov, A. V., Kalimullin, R. F., Smirnov, D. A. (2021) [Modeling the parameters of the technical condition of starter batteries]. *Tehniko-tehnologicheskie problemi servisa* [Technical and technological problems of the service]. Vol. 1, pp. 9–13. (In Russ.).
7. Puzakov, A. V., Smirnov, D. A. (2020) [Development of the load mode of the starter battery]. *Gruzovik* [Truck]. Vol. 11, pp. 30–34. (In Russ.).
8. Smirnov, D. A. (2021) [Assessment of the technical condition of the starter battery]. *Shag v nauku* [Step into science]. Vol. 4, pp. 68–73. (In Russ.).
9. Brik, K. and Ammar, F. (2008) The Fault tree analysis of the lead acid battery's degradation. *Journal of Electrical Systems*. Vol. 4. No 2, pp. 145–159. (In Engl.).
10. Catherino, H., Feres, F. and Trinidad, F. (2004) Sulfation in lead–acid batteries. *Journal of Power Sources*. Vol. 129. Is 1. pp. 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.11.003> (In Engl.).
11. Danko, M. et al. (2019) Overview of batteries State of Charge estimation methods. *Transportation Research Procedia*. Vol. 40. pp. 186–192. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.029> (In Engl.).
12. Kataoka, T. et al. (2019) Battery State Estimation System for Automobiles. *Sei Technical Review*. Vol. 88, pp. 55–58. (In Engl.).
13. Kerley, R., Hyun, J. H. and Ha, D. S. (2015) Automotive lead-acid battery state-of-health monitoring system. *41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 003934-003938, <https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392714>. (In Engl.).
14. Micea, M. V. et al. (2011) Online State-of-Health Assessment for Battery Management Systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 60. No 6, pp. 1997–2006, <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2115630>. (In Engl.).
15. Prasad, V. and Divakar, B. (2018) Real Time Estimation of SOC and SOH of Batteries. *International Journal of Renewable Energy Research*. Vol. 8, No 1, pp. 44–55. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v8i1.6536.g7279> (In Engl.).
16. Puzakov, A. and Smirnov, D. (2020) Physical simulation of the faults of starter batteries, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Vol. 971, pp. 052066, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/5/052066> (In Engl.).
17. Schwimbeck, S., Schroer, P., Buchner, Q. and Herzog, H.-G. (2019) Modeling the Dynamic Behavior of 12V AGM Batteries and Its Degradation, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952242>. (In Engl.).
18. Yahmadi, R., Brik, K. and Ammar, F. (2016) Failures analysis and improvement lifetime of lead acid battery in different applications. *Proceedings of Engineering & Technology (PET)*, pp. 148–154. (In Engl.).
19. Zhang, S. N. et al. (2013) The Failure Analysis and Countermeasures of Starter Battery, *Advanced Materials Research*, Vol. 805–806, pp. 515–518, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.805-806.515> (In Engl.).

Информация об авторе:

Андрей Владимирович Пузаков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

ORCID ID: 0000-0002-9754-8165, **Researcher ID:** G-3297-2015, **Scopus Author ID:** 57212170587

e-mail: and-rew78@yandex.ru

Статья поступила в редакцию: 28.05.2022; принята в печать: 23.09.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Information about the author:

Andrey Vladimirovich Puzakov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Operation and Repair of Cars, Orenburg State University, Orenburg, Russia

ORCID ID: 0000-0002-9754-8165, **Researcher ID:** G-3297-2015, **Scopus Author ID:** 57212170587

e-mail: and-rew78@yandex.ru

The paper was submitted: 28.05.2022.

Accepted for publication: 23.09.2022.

The author has read and approved the final manuscript.