

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВНУТРЕННЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

RESEARCH OF FACTORS AFFECTING THE INTERNAL RESISTANCE OF AUTOMOBILE STORAGE BATTERIES

Исследование факторов, влияющих на внутреннее сопротивление автомобильных аккумуляторных батарей, позволит снизить негативные последствия внезапных отказов. Несмотря на многочисленность публикаций по этой проблематике, практически отсутствуют исследования, в которых изменение структурных и диагностических параметров изучается с помощью физического моделирования характерных неисправностей аккумуляторных батарей. Целью данной работы является анализ изменения внутреннего сопротивления аккумуляторных батарей на основе обработки данных в режиме стартерного разряда. В результате исследования было экспериментально установлено влияние на величину внутреннего сопротивления аккумуляторных батарей температуры электролита, наработки, степени заряженности и степени работоспособности. Предложена математическая модель внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи, учитывающая изменение факторов эксплуатации. Практическое использование данной модели позволит определить техническое состояние аккумуляторной батареи на борту автомобиля.

Ключевые слова: стартерная аккумуляторная батарея, внутреннее сопротивление, степень заряженности, степень работоспособности, температура электролита, наработка, моделирование неисправностей.

The study of the factors affecting the internal resistance of automobile storage batteries will reduce the negative consequences of sudden failures. Despite the large number of publications on this subject, there are almost no studies in which the change of structural and diagnostic parameters is investigated by means of physical modeling of batteries' characteristic failures. The purpose of this work is to analyze the change in the internal resistance of automobile storage batteries based on data processing in the mode of starter discharge. As a result of the study, it was experimentally established that the value of the internal resistance of automobile storage batteries is affected by the electrolyte temperature, operating time, the degree of charging and the degree of serviceability. The author proposes a mathematical model of the battery internal resistance taking into account the change of operation factors. The practical use of this model will allow assessing the technical condition of the automobile storage battery on board the vehicle.

Keywords: automobile storage battery, internal resistance, state of charge, efficiency rate, electrolyte temperature, operating time, failure simulation.

Введение

Работа большинства систем современных автомобилей невозможна без электрической энергии, источниками которой являются аккумуляторная батарея и генератор. Несмотря на то что стартерная аккумуляторная батарея из-за ограниченного срока службы относится к расходным материалам, ее роль в работе автомобиля велика [1].

Учитывая необходимость бесперебойной работы системы электроснабжения автомобиля, важное значение приобретает возможность оперативного контроля технического состояния

стартерной аккумуляторной батареи непосредственно на борту автомобиля. Для этого необходимо установить изменение ее параметров в процессе эксплуатации [2].

К параметрам аккумуляторной батареи можно отнести диагностические (разрядный ток и выходное напряжение), структурные (внутреннее сопротивление), расчетные (степень заряженности SOC, степень работоспособности SOH). Данные параметры тесно связаны между собой: так для расчета степени заряженности [3–6] используется текущее значение напряже-

ния на выводах батареи по формуле (1). Внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи можно вычислить, зная величину разрядного тока, выходного напряжения и напряжения разомкнутой цепи по формуле (2) [7]. Степень работоспособности батареи вычисляют либо на основе данных разрядного тока по выражению (3), либо на основе величины напряжения при эталонной нагрузке по выражению (4) [8–10]:

$$SOC = \frac{OCV - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}}, \quad (1)$$

где OCV — напряжение разомкнутой цепи (open-circuit voltage), В; U_{\max} — максимальное значение напряжения, соответствующее полностью заряженной батарее, В; U_{\min} — минимально допустимое значение напряжения, соответствующее полностью разряженной батарее, В;

$$r_{\phi} = \frac{OCV - U_i}{I_i}, \quad (2)$$

где U_i — текущее значение напряжения на выводах батареи, В; I_i — текущее значение разрядного тока батареи, А;

$$SOH = \left(\frac{I_i}{I_{CCA}} \right)^2, \quad (3)$$

где SOH — степень работоспособности батареи, в долях единицы; I_{CCA} — ток холодного пуска, А;

$$SOH = \frac{U_{cr} - U_1}{U_{new} - U_1}, \quad (4)$$

где U_{cr} — текущее значение напряжения батареи под нагрузкой, В; U_{new} — максимальное значение напряжения под нагрузкой новой батареи, В; U_1 — минимально допустимое напряжение под нагрузкой, В.

Анализируя выражения (1)–(4), можно сделать вывод, что наиболее информативным параметром, учитывающим изменение как напряжения, так и разрядного тока, является внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи [11–14]. Существует три метода измерения внутреннего сопротивления: на постоянном токе (не учитывает наличие внутренней ёмкости), на переменном токе различной частоты (не позволяет разделить импеданс на активную и реактивную составляющие) и метод электрохимической спектроскопии (лишенный перечисленных недостатков, однако требующий дорогостоящего оборудования, больших временных затрат и квалифицированных специалистов). Несмотря на свою простоту,

первый метод дает достаточную для инженерных нужд точность.

Целью статьи является разработка модели внутреннего сопротивления автомобильных аккумуляторных батарей на основе обработки результатов исследования в режиме стартерного разряда при вариации наработки, степени разряженности, температуры электролита и технического состояния.

Методика проведения эксперимента

Параметры аккумуляторной батареи, включая внутреннее сопротивление, находятся в зависимости от режима нагружения. Увеличение разрядного тока приводит к снижению внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи. Наиболее близким к режиму реальной эксплуатации является работа аккумуляторной батареи при запуске стартерного электродвигателя, заторможенного с помощью рычага [15].

Поскольку в данном режиме электродвигатель не вращается, то разрядный ток батареи достигает значительной величины, обусловленной малым омическим сопротивлением электрической цепи (несколько десятков мОм).

Схема замещения аккумулятора (рис. 1) содержит следующие элементы: источник электродвижущей силы (ЭДС), численно равный напряжению разомкнутой цепи батареи; внутреннее (омическое) сопротивление батареи r_{ϕ} , включающее в себя два слагаемых: r_0 — внутреннее сопротивление новой батареи и r_1 — дополнительное сопротивление, вызванное внутренними неисправностями или старением батареи;

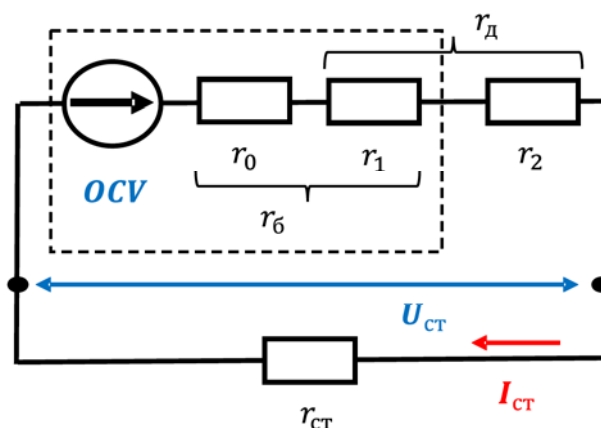


Рис. 1. Расчетная схема режима нагружения аккумуляторной батареи

r_d — дополнительное сопротивление в цепи батареи, включающее в себя r_2 — сопротивление, вызванное окислением полюсных выводов батареи; $r_{ст}$ — сопротивление якорной цепи стартерного электродвигателя.

Внутреннее сопротивление новой аккумуляторной батареи

$$r_0 = \frac{OCV - U_i}{I_i} = \frac{U_{max} - U_{new}}{I_{CCA}}. \quad (5)$$

Эксперименты проводились на аккумуляторных батареях Tyumen Battery Standard 6СТ-60L номинальной ёмкостью 60 А·ч.

На рис. 2 представлены результаты изменения напряжения и разрядного тока аккумуляторной батареи в процессе нагружения (5–6 сек.). Напряжение на выводах батареи вначале резко уменьшается на величину падения напряжения на омическом сопротивлении, затем остается условно постоянным для новой аккумуляторной батареи. При неисправностях и значительной наработке аккумуляторной батареи напряжение продолжит снижаться. Разрядный ток также снижается в процессе нагружения, причем техническое состояние батареи определяет величину снижения. Также на рис. 2 приведены результаты вычисления внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи по формуле (2).

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 3 представлена зависимость между разрядным током и внутренним сопротивлением стартерных аккумуляторных батарей с различной величиной наработки (диапазон от 0 до 35,000 км пробега).

Увеличение наработки (рис. 4) приводит к значительному (более чем в 7 раз) росту внутреннего сопротивления стартерных аккумуляторных батарей.

Модель зависимости внутреннего сопротивления аккумуляторных батарей от наработки можно описать уравнением регрессии:

$$r_6 = r_0 \cdot 1,0000721^L, \quad (6)$$

где L — наработка аккумуляторной батареи, км.

Для получения необходимых значений SOC аккумуляторная батарея принудительно разряжалась до значений напряжения разомкнутой цепи соответственно равных 12,46, 12,31 и 12,15 В. Эти напряжения соответствуют SOC = 75 %, SOC = 50 % и SOC = 25 %. Полностью заряженная аккумуляторная батарея имела напряжение, равное 12,72 В.

На рис. 5 представлена зависимость между разрядным током и внутренним сопротивлением

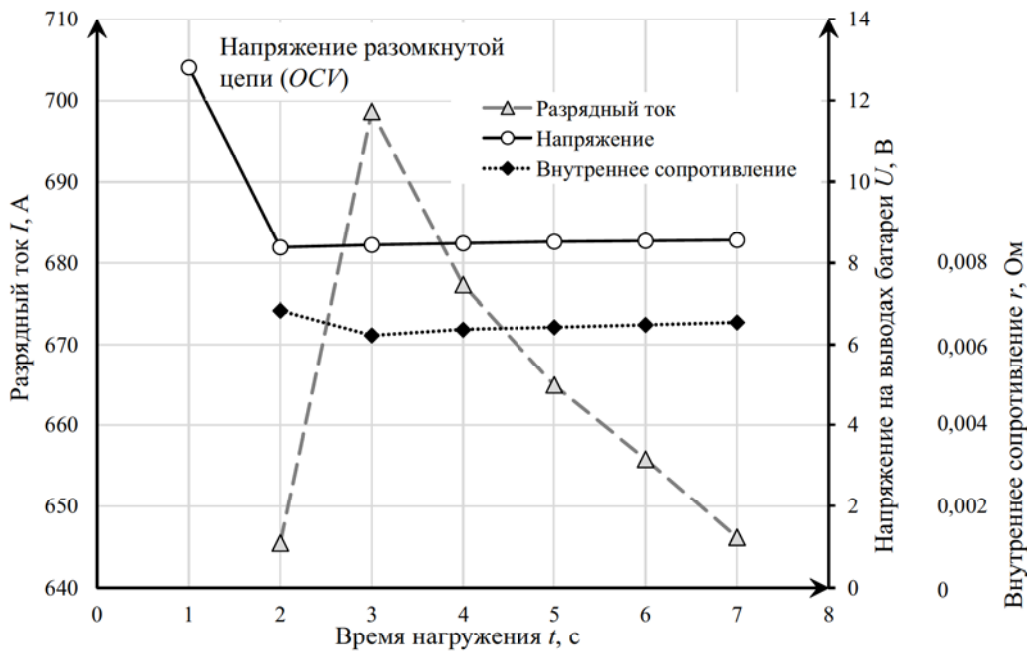


Рис. 2. Изменение параметров новой аккумуляторной батареи в процессе нагружения

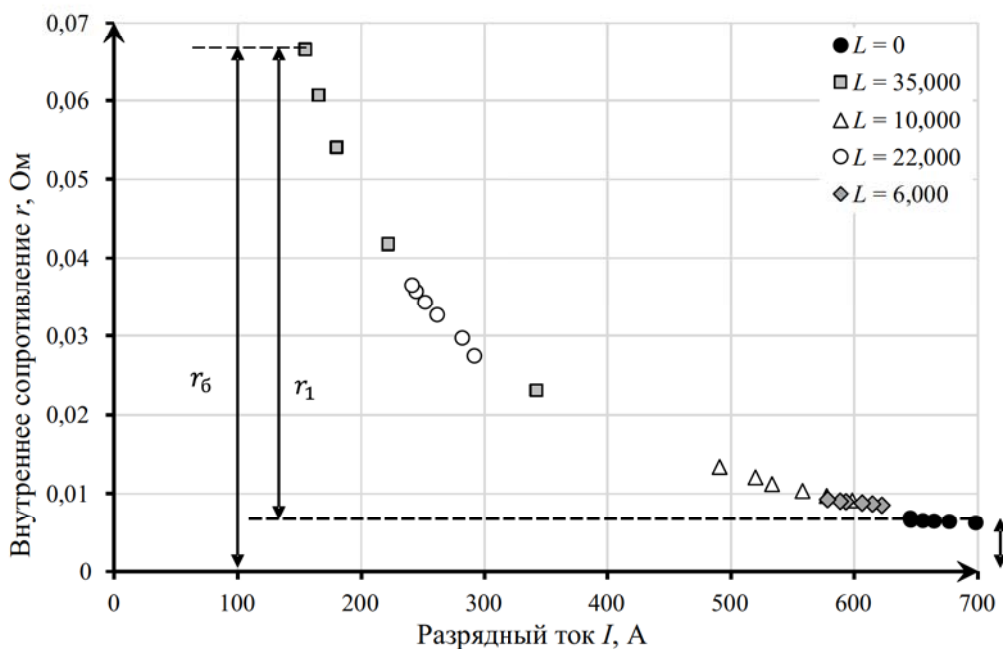


Рис. 3. Внутреннее сопротивление батарей с наработкой

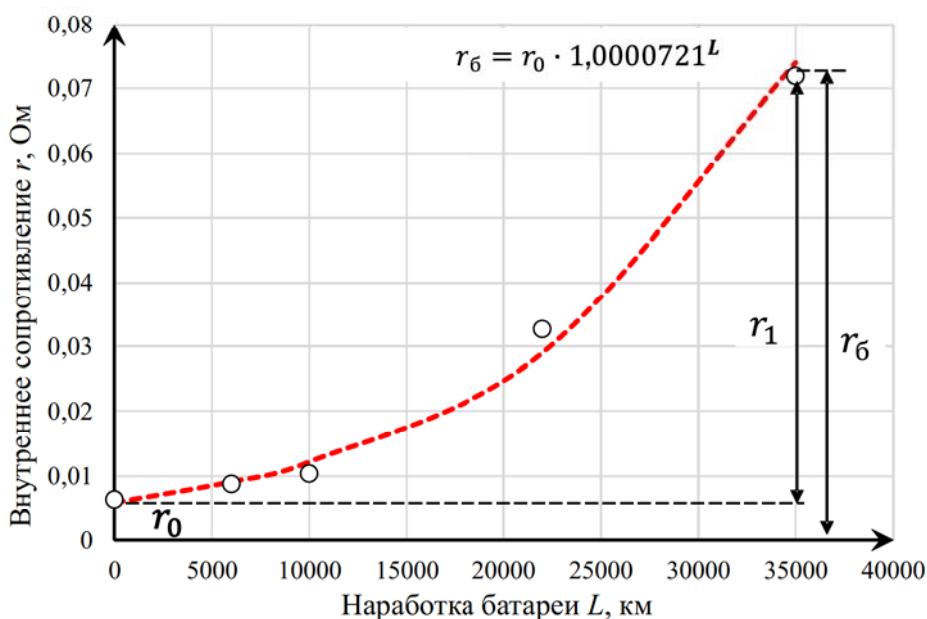


Рис. 4. Зависимость внутреннего сопротивления батарей от наработки

ем аккумуляторной батареи с различной степенью заряженности.

Снижение заряженности ведет к увеличению внутреннего сопротивления [16]. На рис. 6 представлена зависимость внутреннего сопротивления от степени заряженности, из которой следует, что при изменении SOC от 100 % до 25 %

внутреннее сопротивление увеличивается незначительно (всего на 25 %).

Модель зависимости внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи от степени заряженности можно описать уравнением регрессии:

$$r_6 = r_0 + 0,0041 \cdot (U_{\max} - OCV). \quad (7)$$

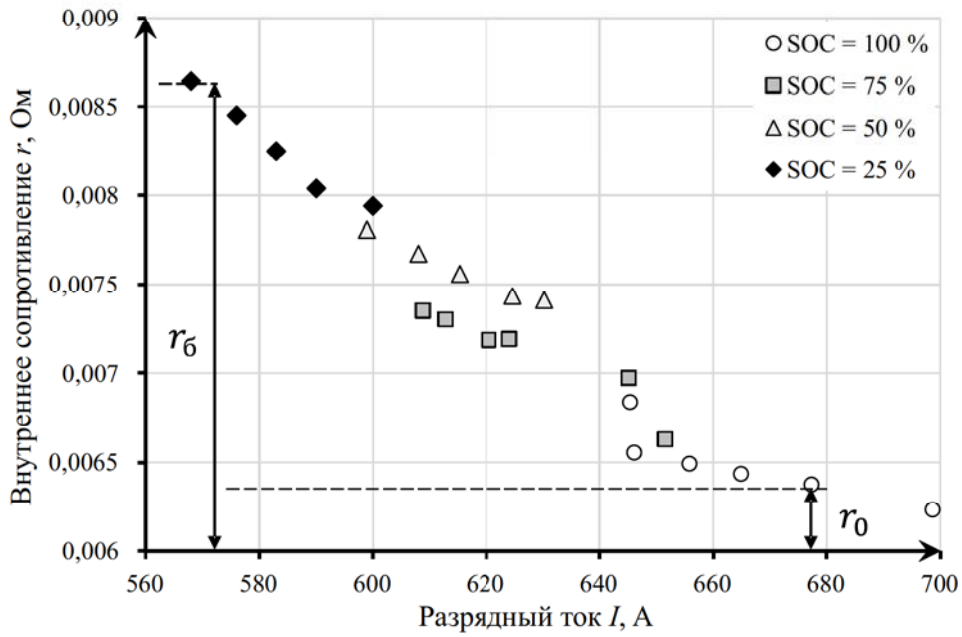


Рис. 5. Внутреннее сопротивление батареи с разной степенью заряженности

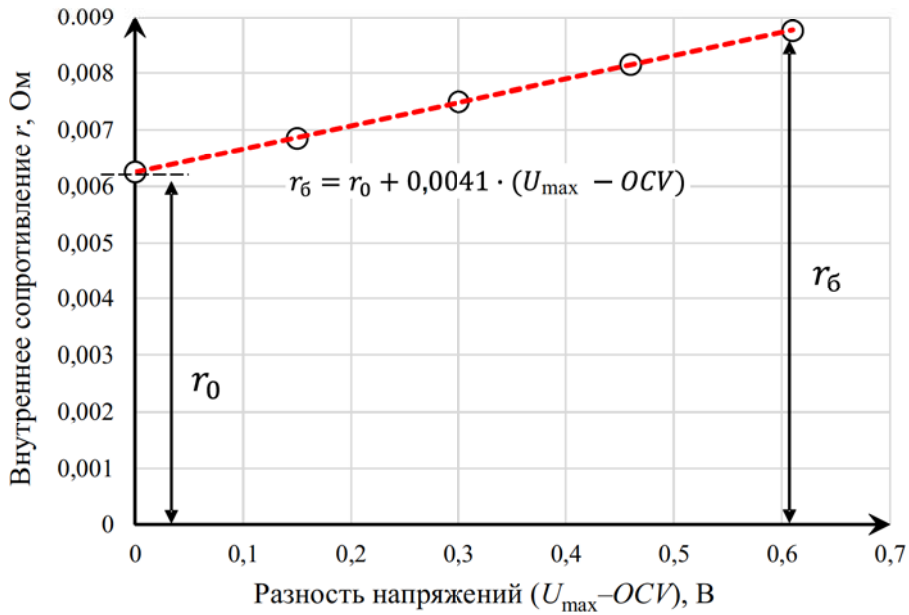


Рис. 6. Зависимость внутреннего сопротивления батареи от степени заряженности

Для исследования температурной зависимости внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи она помещалась в морозильную камеру [14]. Внутрь одного из аккумуляторов батареи помещался датчик температуры, контактирующий с электролитом. После охлаждения до необходимой температуры аккумуляторная

батарея подключалась к стартерному электродвигателю. Результаты экспериментов получены для температуры электролита $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (298 K) (принято за точку отсчета T_0), а также для текущих значений температур: $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$), $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$), $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 43\text{ }^{\circ}\text{C}$) и $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рис. 7).

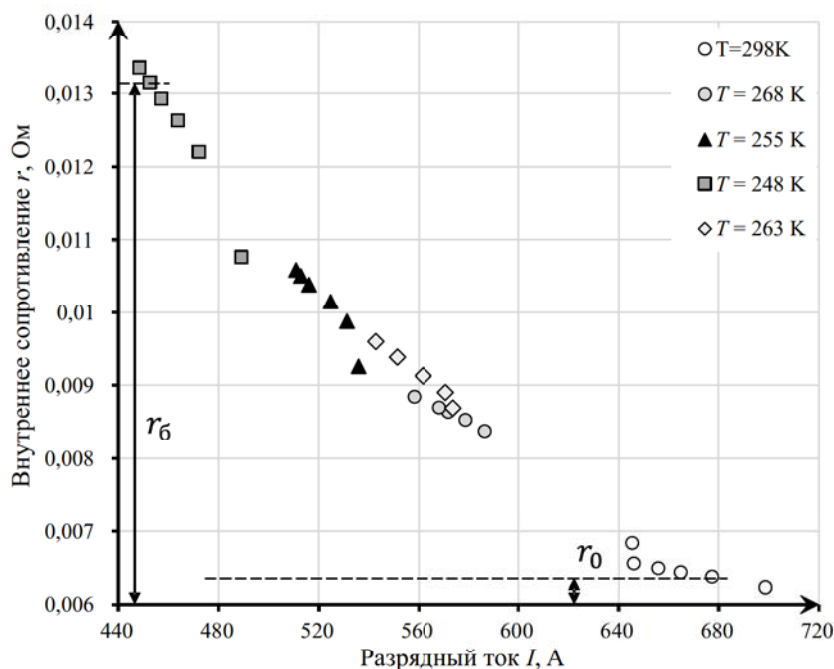


Рис. 7. Внутреннее сопротивление батареи с разной температурой электролита

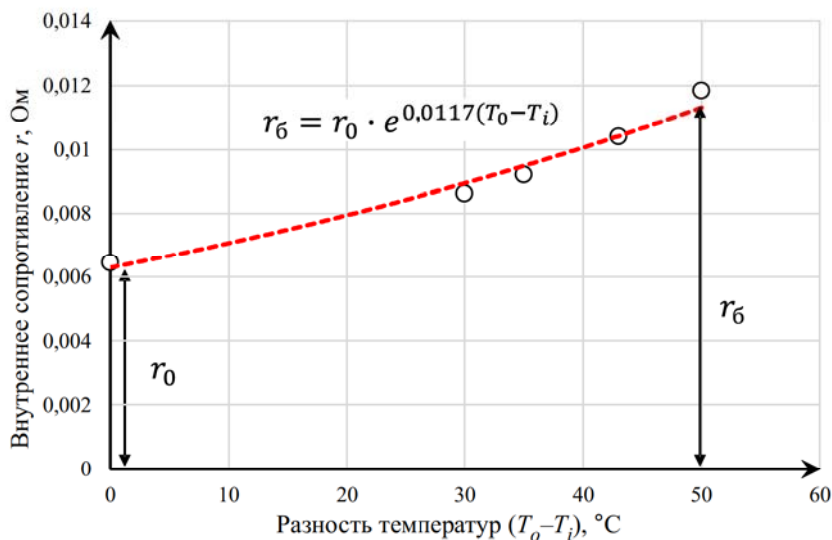


Рис. 8. Зависимость внутреннего сопротивления батареи от температуры электролита

Снижение температуры электролита ведет к увеличению внутреннего сопротивления. На рис. 8 представлена зависимость внутреннего сопротивления от разности температур, из которой следует, что при охлаждении аккумуляторной батареи до температуры $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (248 K) внутреннее сопротивление увеличивается вдвое.

Модель зависимости внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи от разности температур можно описать уравнением регрессии:

$$r_6 = r_0 \cdot e^{0,0117(T_0 - T_i)}, \quad (8)$$

где $T_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ — температура электролита, принятая за нормальное значение; T_i — текущее значение температуры электролита, $^{\circ}\text{C}$.

Для исследования зависимости внутреннего сопротивления от технического состояния аккумуляторных батарей [17–19] были проведены эксперименты по моделированию характерных неисправностей: окисления полюсных выводов и сульфатации пластин.

Для моделирования окисления полюсных выводов последовательно с аккумуляторной батареей подключается активное электрическое сопротивление, изготовленное из тугоплавкого материала (нихром, фехраль). Величина добавочного сопротивления составила 11,5 мОм, 20 мОм и 40 мОм. Результаты этого эксперимента приведены на рис. 9.

Окисление полюсных выводов ведет к резкому (почти в 10 раз) увеличению сопротивления r_2 , являющегося внешним по отношению к аккумуляторной батарее.

Моделирование сульфатации [20] осуществлялось принудительным оголением части пластин путем снижения уровня электролита. Для этого в боковой поверхности аккумуляторной батареи высверливались отверстия для слива электролита. На первом этапе отверстия сверлились на 1/2 высоты пластины соответственно

в одном, трех и шести аккумуляторах. Затем отверстия выполнялись на 1/5 высоты пластины в трех и шести аккумуляторах. Таким образом были исследованы несколько стадий развития сульфатации.

Результаты эксперимента представлены на рис. 10. Уменьшение активной площади пластин аккумуляторной батареи до 20 % от номинальной (стадия 7) привело к увеличению сопротивления r , а значит, и внутреннего сопротивления батареи в три раза от номинального значения.

Увеличение внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи приводит к уменьшению степени работоспособности вследствие снижения разрядного тока. На рис. 11 представлена зависимость степени работоспособности батареи от внутреннего сопротивления.

Модель зависимости степени работоспособности батареи от внутреннего сопротивления можно описать уравнением регрессии:

$$SOH = 0,036 \cdot r_6^{-1,56}. \quad (9)$$

Таким образом, установлен характер изменения внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи при изменении степени заряженности, степени работоспособности, температуры

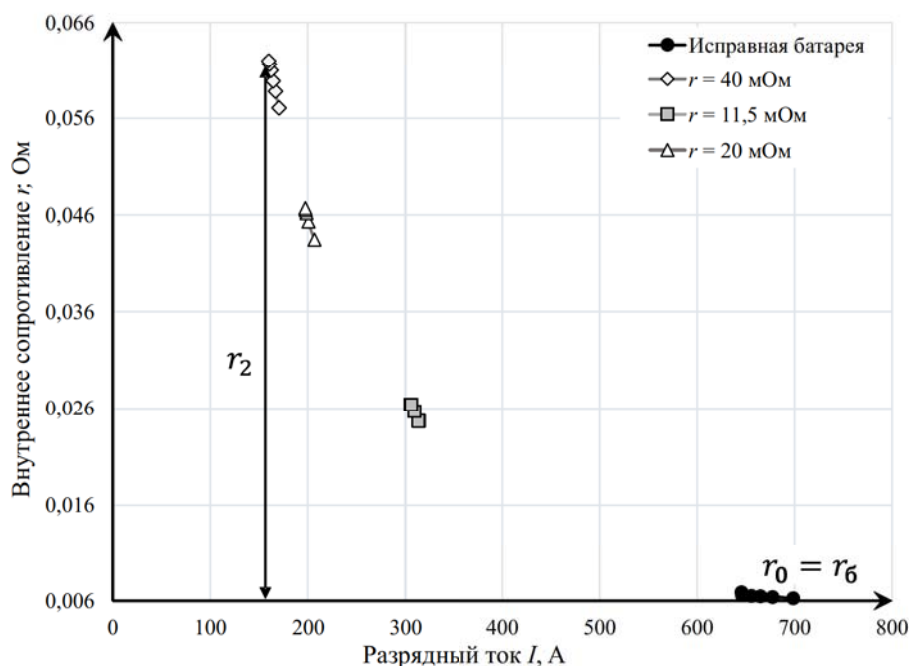


Рис. 9. Внутреннее сопротивление батареи при моделировании окисления полюсных выводов

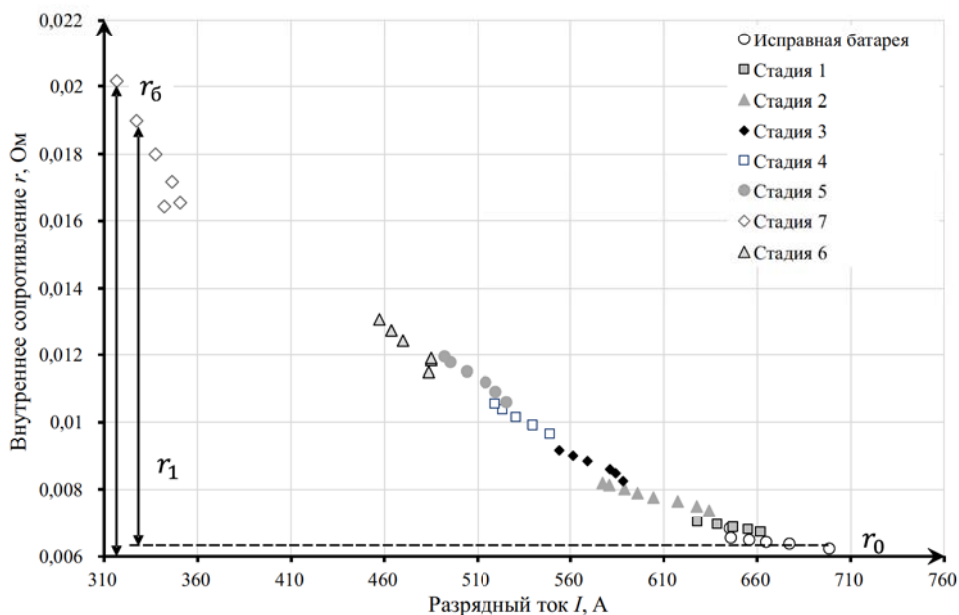


Рис. 10. Внутреннее сопротивление батареи при моделировании сульфатации пластин

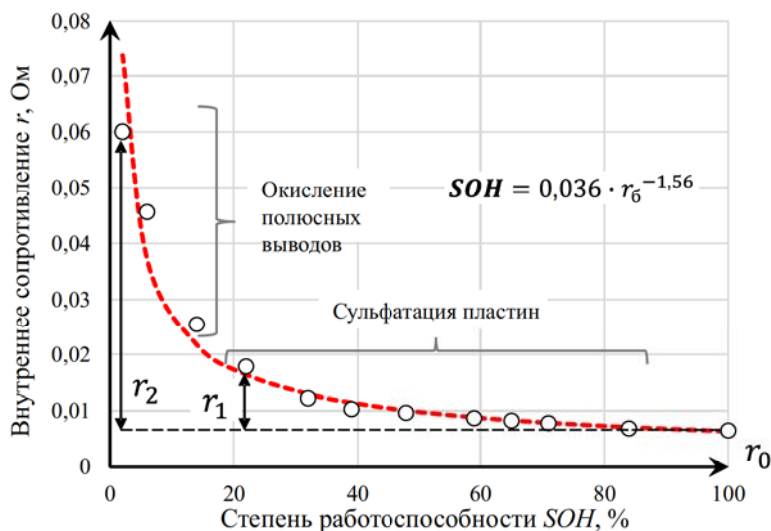


Рис. 11. Зависимость степени работоспособности батареи от внутреннего сопротивления

электролита и наработки. Вышеперечисленные факторы воздействуют на аккумуляторную батарею независимо друг от друга. Тогда математическую модель внутреннего сопротивления стартерной аккумуляторной батареи можно представить в виде следующей многофакторной зависимости:

$$r_6 = r_0 \cdot 1,0000721^L \cdot e^{0,0117(T_0 - T_i)} \times (1 + 0,0041(U_{\max} - OCV)) + r_{\text{д}}. \quad (10)$$

Данная математическая модель позволяет определить внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи при вариации значений входящих в нее факторов. Следовательно, зная текущую температуру электролита и степень заряженности, можно определить техническое состояние аккумуляторной батареи, устанавливаемое величиной наработки и степенью работоспособности (наличием неисправностей). Если помимо темпе-

ратуры электролита и степени заряженности известна также наработка аккумуляторной батареи, задача определения работоспособности аккумуляторной батареи существенно упрощается.

Выводы

Оперативный контроль технического состояния стартерной аккумуляторной батареи непосредственно на борту автомобиля возможен в случае установления количественного изменения ее параметров в процессе эксплуатации.

Наиболее информативным параметром, учитывающим изменения как разрядного тока, так и напряжения на выводах, является внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи.

Для определения внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи использовался режим нагружения на стартерный электродвигатель с заторможенной шестерней.

Экспериментально определено влияние на величину внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи температуры электролита, наработки, степени заряженности и степени работоспособности.

Предложена математическая модель внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи, учитывающая изменение факторов эксплуатации. Практическое использование данной модели позволит определить техническое состояние аккумуляторной батареи на борту автомобиля.

Библиографический список

1. Puzakov A. Estimation of efficiency of electric power balance in automobiles // *Transport Problem*. Vol. 16. Iss. 2. 2021. Pp. 113–120. DOI: 10.21307/tp-2021-027
2. 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.
3. Sato S., Kawamura A. A new estimation method of state of charge using terminal voltage and internal resistance for lead acid battery // *Proceedings of the Power Conversion Conference*. Vol. 2. 2002. Pp. 565–570, DOI: 10.1109/PCC.2002.997578.
4. Ng K., Moo C., Chen Y.-P., Hsieh Y. State-of-charge estimation for lead-acid batteries based on dynamic open-circuit voltage // *International Power and Energy Conference*. 2008. Pp. 972–976. DOI: 10.1109/PECON.2008.4762614.
5. Chang W.-Y. The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review // *International Scholarly Research Notices*. Vol. 2013, Article ID 953792. 10.1155/2013/953792.
6. Chiasson J., Vairamohan B. Estimating the state of charge of a battery // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Vol. 13. 2005. No. 3. Pp. 465–470. DOI: 10.1109/TCST.2004.839571.
7. Danko M., Adamec J., Taraba M., Drgona P. Overview of batteries State of Charge estimation methods // *Transportation Research Procedia*. No. 40. 2019. Pp. 186–192. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.029.
8. Marchildon J., Doumbia M.L., Agbossou K. SOC and SOH characterisation of lead acid batteries // *41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2015. Pp. 001442–001446.
9. Prasad V., Divakar B. Real Time Estimation of SOC and SOH of Batteries // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2018. No. 8. Pp. 44–55.
10. Kataoka T., Takechi H., Hatanaka A., Yamaguchi Y., Matsuura T., Matsutani Y. Battery State Estimation System for Automobiles // *Sei Technical Review*. No. 88. 2019. Pp. 55–58.
11. Ramadan M. N., Pramana B. A., Widayat S. A., Amifia L. K., Cahyadi A., Wahyunggoro O. Comparative Study Between Internal Ohmic Resistance and Capacity for Battery State of Health Estimation // *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*. 2015. Vol. 6. No. 2. Pp. 113–122.
12. Постников А. А. Экспериментальное исследование изменения внутреннего сопротивления свинцово-кислотного аккумулятора // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2020. Вып. 5. С. 415–422.
13. Nakajo K., Kumarasinghe S., Shimamura Y., Takahashi S., Motegi K., Shiraishi Y. On-line measurement system for internal resistance in lead acid battery // *55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*. 2016. Pp. 103–108.
14. Broda B., Inzelt G. Internal resistance and temperature change during over-discharge of lead-acid battery // *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. 2018. No. 8. Pp. 129–139.
15. Пузаков А. В., Смирнов Д. А. Разработка нагрузочного режима стартерной аккумуляторной батареи // *Грузовик*. 2020. № 11. С. 30–34.
16. 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.
17. Puzakov A., Smirnov D. Physical simulation of the faults of starter batteries // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Vol. 971. 2020. Pp. 052066. DOI: 10.1088/1757-899X/971/5/052066
18. Yahmadi R., Brik K., Ammar F. Failures analysis and improvement lifetime of lead acid battery in different

applications // *Proceedings of Engineering & Technology (PET)*. Pp. 148–154. 2016.

19. Zhang S.N., Xie P., Yang R.S., Shao T.Z. The Failure Analysis and Countermeasures of Starter Battery // *Advanced Materials Research*, 805-806. 2013. Pp. 515–518.

20. Catherino H., Feres F., Trinidad F. Sulfation in lead–acid batteries // *Journal of Power Sources*, No. 129. 2004. Pp. 113–120.

References

1. Puzakov A. Estimation of efficiency of electric power balance in automobiles. *Transport Problem*, 2021, vol. 16, iss. 2, pp. 113–120 DOI: 10.21307/tp-2021-027

2. Puzakov A. V., Kalimullin R. F., Smirnov D. A. *Modelirovanie parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya starternykh akkumulyatornykh batarey* [Modeling of parameters of technical condition of starter batteries]. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa – Technical-technological problems of service*, 2021, no. 1, pp. 9–13.

3. Sato S., Kawamura A. A new estimation method of state of charge using terminal voltage and internal resistance for lead acid battery. *Proceedings of the Power Conversion Conference*, 2002, vol. 2, pp. 565–570. DOI: 10.1109/PCC.2002.997578.

4. Ng K., Moo C., Chen Y.-P., Hsieh Y. State-of-charge estimation for lead-acid batteries based on dynamic open-circuit voltage. *International Power and Energy Conference*, 2008, pp. 972–976. DOI: 10.1109/PECON.2008.4762614.

5. Chang W.-Y. The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review. *International Scholarly Research Notices*, vol. 2013, Article ID 953792. 10.1155/2013/953792.

6. Chiasson J., Vairamohan B. Estimating the state of charge of a battery. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, vol. 13, no. 3, pp. 465–470. DOI: 10.1109/TCST.2004.839571.

7. Danko M., Adamec J., Taraba M., Drgona P. Overview of batteries' state of charge estimation methods. *Transportation Research Procedia*, 2019, no. 40, pp. 186–192. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.029.

8. Marchildon J., Doumbia M. L., Agbossou K. SOC and SOH characterisation of lead acid batteries. *Proceedings of the 41-st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2015, pp. 001442–001446.

9. Prasad V., Divakar B. Real Time Estimation of SOC and SOH of Batteries. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2018, no. 8, pp. 44–55.

10. Kataoka T., et al. Battery State Estimation System for Automobiles. *Sci Technical Review*, 2019, no. 88, pp. 55–58.

11. Ramadan M.N., et al. Comparative study between internal ohmic resistance and capacity for battery state of health estimation. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*. 2015, vol. 6, no. 2, pp. 113–122.

12. Postnikov A. A. *Eksperimental'noe issledovanie izmeneniya vnutrennego soprotivleniya svintsovo-kislotnogo akkumulyatora* [Experimental study of the change in the internal resistance of the lead-acid battery]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki – Proceedings of Tula State University. Technical sciences*, 2020, iss. 5, pp. 415–422.

13. Nakajo K., et al. On-line measurement system for internal resistance in lead acid battery. *Proceedings of the 55-th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, 2016, pp. 103–108.

14. Broda B., Inzelt G. Internal resistance and temperature change during over-discharge of lead-acid battery. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 2018, no. 8, pp. 129–139.

15. Puzakov A. V., Smirnov D. A. *Razrabotka nagruzochnogo rezhima starternoy akkumulyatornoy batarei* [Development of loading mode of starter battery]. *Gruzovik – Truck*, 2020, no. 11, pp. 30–34

16. Kochurov A. A., Postnikov A. A., Gumelyov V. Yu. *Metodika otsenki stepeni razryazhennosti svintsovykh akkumulyatorov v ekspluatatsii* [Methodology for assessing the degree of discharging of lead batteries in operation]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii – Modern scientific research and innovations*, 2016, no. 6(62), pp. 231–237.

17. Puzakov A., Smirnov D. Physical simulation of the faults of starter batteries. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 971, pp. 052066. DOI: 10.1088/1757-899X/971/5/052066

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

19. Zhang S. N., Xie P., Yang R. S., Shao T. Z. The failure analysis and countermeasures of starter battery. *Advanced Materials Research*, 2013, 805-806, pp. 515–518.

20. Catherino H., Feres F., Trinidad F. Sulfation in lead–acid batteries. *Journal of Power Sources*, 2004, no. 129, pp. 113–120.