

УДК 656.138

Кацуба Ю.Н., кандидат технических наук., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, СПб, Россия, katsuba60@mail.ru

Кочегаров М.Е., Аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, СПб, Россия., mishutka99@bk.ru

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА

Аннотация. Существует объективная проблема определения текущей работоспособности и остаточного ресурса тяговой аккумуляторной батареи (АКБ) электромобиля на который оказывают значительное влияние внешние факторы: температура окружающей среды, рельеф местности, оценка дорожного покрытия, технология зарядки, квалификация водителя. В данной статье рассмотрены методы определения остаточного ресурса (RUL) и текущей работоспособности (SOH) тяговой АКБ электромобиля. Предложена методика определения работоспособности и остаточного ресурса тяговой АКБ электромобиля на основе нейросетевого подхода, учитывающая внешние факторы.

Ключевые слова: диагностирование; тяговая аккумуляторная батарея; оценка SOH; прогнозирование RUL; прогноз состояния аккумулятора.

Введение

В современном автомобильном трафике с каждым годом становится все больше транспортных средств с приводом от электродвигателя, это как различные варианты гибридов, так и полностью электрические автомобили [1-3]. В данных транспортных средствах, для хранения и накопления энергии применяется тяговая аккумуляторная батарея (АКБ). В основном производители отдают предпочтение литий-ионным аккумуляторам различной конструкции, из-за их высокой плотности энергии, длительного времени цикла, низкими показателями саморазряда и т.д [4].

Однако в процессе эксплуатации транспортного средства литиевые аккумуляторы могут подвергаться деградации, что уменьшает их показатель работоспособности (State of Health (SOH)) рис.1 [5].

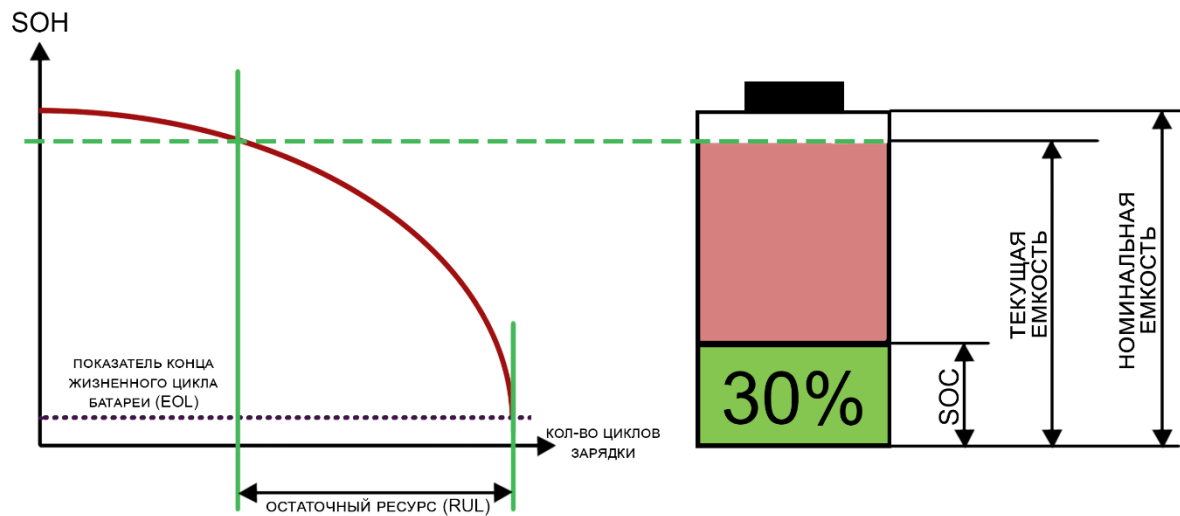


Рис. 1. Соотношение SOH и RUL от количества циклов зарядки [5]

Показатель остаточного ресурса (Remaining useful life (RUL)) можно вычислить по методу циклов заряд-разряда [5].

$$RUL = N_{max} - N_{текущее} \quad (1)$$

Где: N_{max} – максимальное число циклов до конца срока службы (из спецификации или эксперимента);

$N_{текущее}$ – текущее количество отработанных циклов.

Показатель SOH технического состояния АКБ, является условным, и каждый производитель его считает по-своему, и при расчетах по методу на основе SOH и деградации ёмкости, не учитываются различные внешние факторы. Также показатель уровня заряда (State of charge (SOC)) зависит от зависимостей $C_{текущая}$ от $C_{номинальная}$ [5].

$$SOC = \frac{C_{текущая}}{C_{номинальная}} \times 100\%. \quad (2)$$

$$SOH = \frac{Q_{max}}{Q_{номинальная}} \times 100\%. \quad (3)$$

Где: Q_{max} – максимально доступная ёмкость;

$Q_{номинальная}$ – номинальная ёмкость.

Существующие подходы к диагностированию сосредоточены преимущественно на контроле внутренних параметров, таких как остаточная

ёмкость, внутреннее сопротивление, количество зарядно-разрядных циклов и температура ячеек. Этой, информации как показывают научные исследования в данном направлении [4-11], недостаточно для формирования полной и объективной оценки технического состояния тяговой АКБ.

При диагностировании тяговой АКБ электромобиля важно учитывать не только её внутренние характеристики при определении SOH и остаточного ресурса, но и внешние факторы, которые могут оказывать существенное влияние на состояние и срок службы батареи.

Прежде всего, необходимо отметить, что в ходе эксплуатации внешняя среда оказывает непосредственное влияние на функционирование аккумулятора. Так, например, температурные условия играют критически важную роль: работа батареи в условиях низкой температуры значительно увеличивает её внутреннее сопротивление, снижая эффективность, тогда как высокая температура ускоряет химическую деградацию, снижая общий срок службы [7].

Кроме того, немаловажное значение имеет стиль вождения электромобиля. Частые ускорения, торможения, движение по пересечённой местности или в гористой местности приводят к возрастанию нагрузки на батарею, что приводит к перегреву и ускоренной деградации. Также стоит учитывать и условия заряда АКБ. Так при применении протокола быстрой зарядки, особенно при высоких температурах, ускоряет деградацию АКБ по сравнению со стандартной медленной зарядкой в более штатных условиях [9].

Таким образом, становится, очевидно, что без учета внешних факторов при диагностировании тяговой АКБ показатель SOH будет неполный, а прогнозирование остаточного ресурса будет не корректно. Только комплексный подход, включающий как внутренние параметры батареи, так и внешние условия эксплуатации, позволяет провести качественное диагностирование. Это, в свою очередь, способствует более точному прогнозированию остаточного ресурса, своевременному выявлению потенциальных проблем и повышению общей эксплуатационной надежности электромобиля. Математическое моделирование данных параметров затруднено в виду нелинейности процессов. В данном

случае, возможно, решить поставленную задачу, если применить нейросетевой подход. Так обученная нейронная сеть (НС) позволяет найти скрытые зависимости, одной величины от другой, которые невозможно определить методами прямых измерений.

Материалы и методы

Процесс диагностирования аккумуляторных батарей на транспортном средстве является ключевым фактором повышения надежности и эффективности эксплуатации. Современные технологии на основе искусственного интеллекта (ИИ) с применением машинного обучения (МО) позволяют более точно определять показатель текущей SOH тяговой АКБ. Применение данных технологий позволяют получать данные об остаточном ресурсе тяговой АКБ, чтобы оптимизировать обслуживание и снизить эксплуатационные затраты [10].

Для данного исследования была разработана структурная схема диагностирования тяговой АКБ, представленная на рис. 2.

На схеме показана блочная структура, состоящая из следующих элементов:

- блок ЭБУ ТС для контроля показателей работоспособности тяговой АКБ автономно на самом ТС;
- блок учета влияния внешних факторов;
- внешний вычислительный блок (ВВБ) представлен в виде внешнего хранилища и вычислительной машины.

Все блоки связаны между собой и способны обмениваться информацией по Vehicle-to-everything (V2X). Такая архитектура позволяет с внешнего устройства запросить информацию о техническом состоянии АКБ ТС и путем обмена информацией по защищенным каналам связи получить информацию с сервера, а информация непосредственно с ТС, поступает на сервер для ее дальнейшей обработки.

В блок внешнего вычислительного устройства интегрирован блок на основе нейросетевого подхода, который предназначен для сбора и обработки параметров внешних факторов.

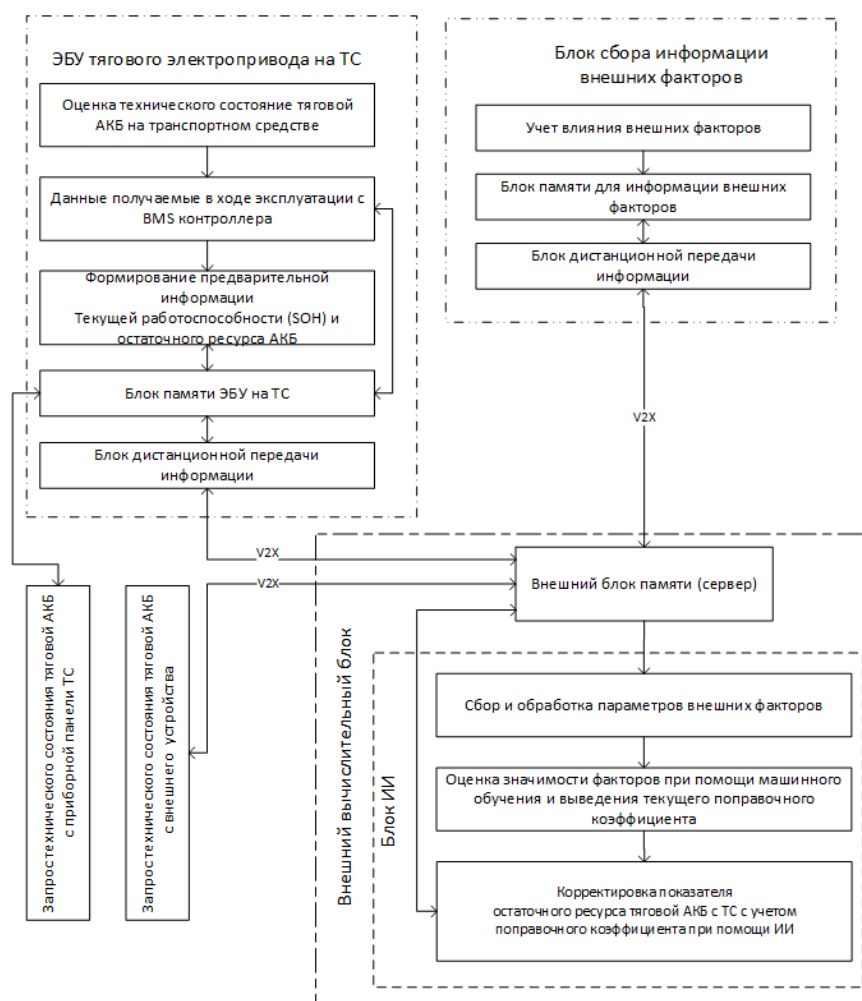


Рис. 2. Структурная схема диагностирования тяговой АКБ [Составлено авторами]

Данные показатели значимости внешних факторов и их оценка, проводится путем применения метода ранжирования. На основе полученной информации будет происходить обучение нейронной сети, с целью научить ИИ, вычислять поправочный коэффициент для корректировки показателя остаточного ресурса. Благодаря обученной нейронной сети появляется возможность найти скрытые зависимости, одной величины от другой, которые невозможно определить методами прямых измерений. В дальнейшем полученная информация записывается в ВВБ на сервере, доступ к которой, при необходимости, можно получить как на самом ТС, так и с внешнего устройства.

В свою очередь, текущий и промежуточный контроль значений параметров работоспособности на ТС позволяет осуществить прогнозирование технического состояния АКБ в конкретном временном интервале. Точность прогноза зависит от

обучающей выборки, количества слоев НС, вида связей между слоями, выбора функции активации, а также от ряда других факторов.

Ниже представлена разработанная для решения поставленной задачи алгоритм последовательности диагностирования тяговой АКБ с учетом внешних факторов и применением нейронных сетей рис.3.

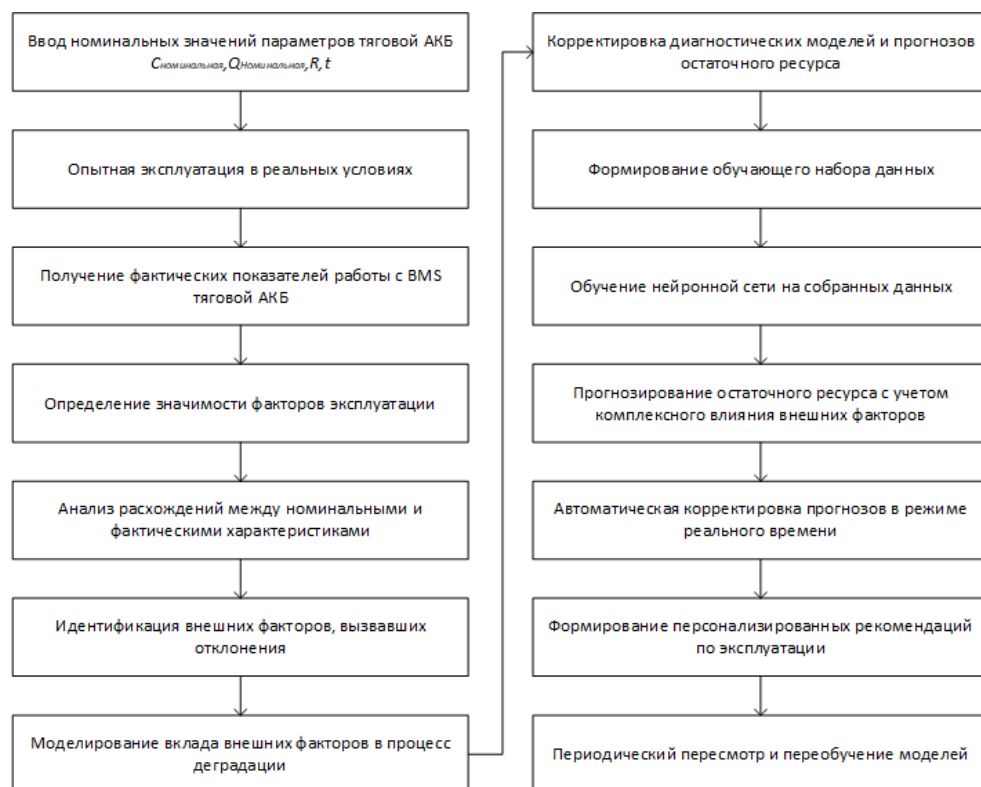


Рис. 3. Алгоритм диагностирования тяговой АКБ [Составлено авторами]

Выводы

Таким образом, проведенным исследованием было установлено, что тяговые АКБ играют критически важную роль в общей системе оценки технического состояния ТС с электрическим приводом. Как показал анализ, преждевременный выход из строя тяговой АКБ может повлечь за собой отказ, значительные экономические издержки, в том числе связанные с ремонтом, с дорогостоящей заменой батареи и простоем ТС. В связи с этим становится очевидным, что вопросы диагностирования тяговых АКБ требуют комплексного и системного подхода. В представленной статье акцент сделан на ключевых направлениях, в рамках которых будет продолжено дальнейшее исследование. В частности, внимание будет уделено вопросам оценки работоспособности SOH и прогнозированию остаточного ресурса

(RUL) с учётом влияния внешних факторов, таких как температурный режим, стиль вождения, режимы зарядки и т. д. Для обеспечения точности и своевременности определения технического состояния тяговой АКБ предполагается применение современных методов анализа данных, на основе нейросетевой подход, что позволит минимизировать риски внезапных отказов и оптимизировать затраты на обслуживание и ремонт ТС.

Список использованных источников

1. Сегмент SUV захватил лидерство в парке электрокаров и гибридов [Электронный ресурс] // Автостат: сайт. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/58503/> (дата обращения: 15.04.2025)
2. В России зарегистрировано 90 тысяч электрокаров и гибридов [Электронный ресурс] // Автостат: сайт. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/58435/> (дата обращения: 15.04.2025)
3. Продажи электромобилей в России [Электронный ресурс] // Автостат: сайт. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/57785/> (дата обращения: 15.04.2025)
4. Sadegh Kouhestani, H., Yi, X., Qi, G., Liu, X., Wang, R., Gao, Y., Yu, X., & Liu, L. (2022). Prognosis and Health Management (PHM) of Solid-State Batteries: Perspectives, Challenges, and Opportunities. *Energies*, 15(18), 6599. <https://doi.org/10.3390/en15186599>
5. Zhao, J., Zhu, Y., Zhang, B., Liu, M., Wang, J., Liu, C., & Hao, X. (2023). Review of State Estimation and Remaining Useful Life Prediction Methods for Lithium-Ion Batteries. *Sustainability*, 15(6), 5014. <https://doi.org/10.3390/su15065014>
6. Akbar, K., Zou, Y., Awais, Q., Baig, M. J. A., & Jamil, M. (2022). A Machine Learning-Based Robust State of Health (SOH) Prediction Model for Electric Vehicle Batteries. *Electronics*, 11(8), 1216. <https://doi.org/10.3390/electronics11081216>
7. Huang, S.-C., Tseng, K.-H., Liang, J.-W., Chang, C.-L., & Pecht, M. G. (2017). An Online SOC and SOH Estimation Model for Lithium-Ion Batteries. *Energies*, 10(4), 512. <https://doi.org/10.3390/en10040512>

8. X. Cui and T. Hu, "State of Health Diagnosis and Remaining Useful Life Prediction for Lithium-ion Battery Based on Data Model Fusion Method," in IEEE Access, vol. 8, pp. 207298-207307, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038182>
9. Ming-Feng Ge, Yiben Liu, Xingxing Jiang, Jie Liu, A review on state of health estimations and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries, Measurement, 174, 2021, 109057, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109057>
10. Kocsis Szürke, S., Sütthö, G., Apagy, A., Lakatos, I., & Fischer, S. (2022). Cell Fault Identification and Localization Procedure for Lithium-Ion Battery System of Electric Vehicles Based on Real Measurement Data. Algorithms, 15(12), 467. <https://doi.org/10.3390/a15120467>
11. Natthida Sukkam, Thossaporn Onsree, Nakorn Tippayawong; Overview of machine learning applications to battery thermal management systems in electric vehicles. AIP Conf. Proc. 17 November 2022; 2681 (1): 020004. <https://doi.org/10.1063/5.0115829>

Katsuba Y.N., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia, katsuba60@mail.ru

Kochegarov M.E., Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia., mishutka99@bk.ru

A METHOD FOR DETERMINING THE OPERABILITY (SOH) AND RESIDUAL RESOURCE (RUL) OF AN ELECTRIC VEHICLE TRACTION BATTERY BASED ON A NEURAL NETWORK APPROACH

Abstract. There is an objective problem of determining the current operability (SOH) and residual resource (RUL) of an electric vehicle traction battery, which is significantly influenced by external factors: ambient temperature, terrain, road surface assessment, charging technology, driver qualifications. This article discusses methods for determining the residual resource (RUL) and current operability (SOH) of an electric vehicle traction battery. A method for determining the operability (SOH) and residual resource (RUL) of an electric vehicle traction battery based on a neural network approach, taking into account external factors, is proposed.

Keywords: Diagnostics; traction battery; SOH assessment; RUL forecasting; battery condition forecast.