

УДК 621.355

М. Т. АЗАМАТОВ, докторант PhD (Торайгыров Университет)
М. В. ЯРОСЛАВЦЕВ, к.т.н., ассоциированный профессор (доцент)
(Торайгыров Университет)
г. Павлодар, Казахстан

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ЭНЕРГИИ ЦИКЛОВ ЗАРЯДА-РАЗРЯДА

Введение. Аккумуляторы на основе соединений лития получают все более широкое распространение благодаря высоким удельным значениям энергоемкости и мощности. Основным их недостатком является высокая удельная стоимость. Необходимость повышения эффективности использования накопителей энергии ставит проблему численного описания влияния особенностей режима эксплуатации аккумуляторов на их ресурс. Это позволит оценить эффект возможных мероприятий по оптимизации эксплуатационных режимов.

Зависимость ресурса аккумулятора от глубины разряда. Рядом авторов выполнены работы по исследованию влияния глубины разряда литий-ионных аккумуляторов на количество циклов заряда-разряда [1-5]. Они показывают, что упрощенное представление о постоянстве перерабатываемого (принимаемого и отдаваемого) аккумулятором в течение периода эксплуатации объема энергии является неточным. Как показано в приведенных работах, сокращение глубины разряда (DOD – depth of discharge), например, с 80% до 10% привело бы к увеличению объема перерабатываемой энергии в 2 и более раза, в зависимости от выбранной авторами модели описания свойств аккумулятора.

На рисунке 1 показаны зависимости относительной величины перерабатываемого аккумулятором объема энергии от глубины заряда-разряда $k(DOD)$, рассчитанные на основании эмпирических кривых, полученных в работах [1, 3]. За 100% принят ресурс аккумулятора при полном разряде в каждом цикле. Если известен циклический ресурс аккумулятора N_{100} , измеренный для циклов полного заряда-разряда, тогда ресурс N_{DOD} для любого неполного цикла с заданной величиной DOD может быть определен по выражению (1):

$$N_{DOD} = k(DOD) \cdot \frac{100\%}{DOD} N_{100} \quad (1)$$

Как правило, реальные режимы эксплуатации аккумуляторных батарей характеризуются непостоянством глубины разряда, характеризуемой как отношение отданной в цикле энергии к полной энергоемкости нового аккумулятора. При этом границами цикла являются моменты смены направления протекающего через аккумулятор тока. При неравенстве энергий заряда и разряда границы циклов выделяются по принципу, предложенному в [5]. Такая методика сохраняет суммарную энергию, принятую и отданную во всех циклах, не занижая глубины разряда в наиболее энергоемком из них.

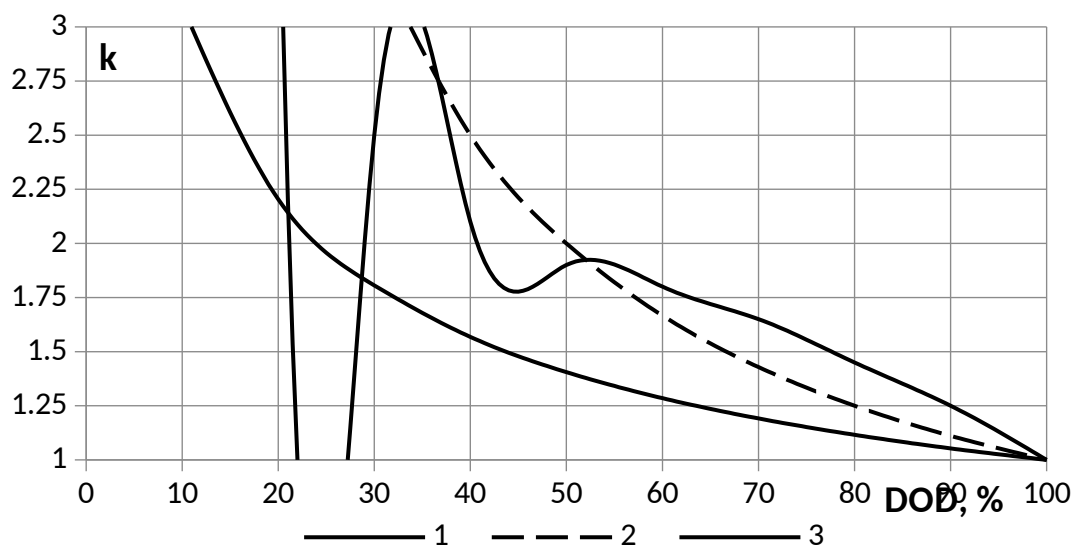


Рис. 1. Зависимость перерабатываемого аккумулятором объема энергии от относительной глубины заряда-разряда литий-железофосфатных аккумуляторов: 1, 2 – по данным [1], 3 – по данным [4]

Существует большое количество причин неравномерности глубины разряда. Например, даже для аккумуляторов транспортных средств, эксплуатируемых на постоянном маршруте, может потребляться различное количество энергии [6]. Расход определяется степенью загрузки транспортного средства, сопротивлением движению, зависящим от температуры окружающего воздуха, затратами на поддержание температурного режима салона, условиями дорожного движения и другими факторами. Кроме циклов заряда-разряда, необходимых для начала автономной работы транспортного средства, для тяговых аккумуляторов характерны сравнительно малые по времени (5-30 с) и объему энергии (до 1 кВт·ч) циклы заряда-разряда, вызванные приемом энергии торможения. Необходимо отметить, что при малой протяженности автономного хода размер аккумуляторной батареи определяется её мощностью, а энергоемкость может использоваться не полностью, что положительно сказывается на ресурсе аккумулятора.

Расчет ресурса аккумуляторов. Учитывая, что для литиевых аккумуляторов слабо выражен эффект памяти, можно сделать предположение, что каждый из циклов заряда-разряда оказывает независимое влияние на процессы деградации и срок службы аккумулятора.

Предполагается также, что закон распределения циклов заряда-разряда по принимаемой и отдаваемой энергии неизменен, то есть случайный процесс потребления энергии является стационарным. Также ожидается постоянство внешних факторов, влияющих на срок службы аккумулятора, таких как предельные уровни напряжения, ток разряда и заряда, температура и т.д.

С учетом выполненных предположений, срок службы аккумулятора может быть определен по заданному закону распределения энергии циклов его заряда-разряда. Пример такого распределения для тягового привода электробуса, найденного на основании записей бортового самописца [7], показан на рисунке 2. При расчете энергии батареи предполагалось, что её заряд производится по завершении каждого рейса протяженностью 11 км. При этом энергоёмкость бортовой батареи определена по мощности тягового привода.

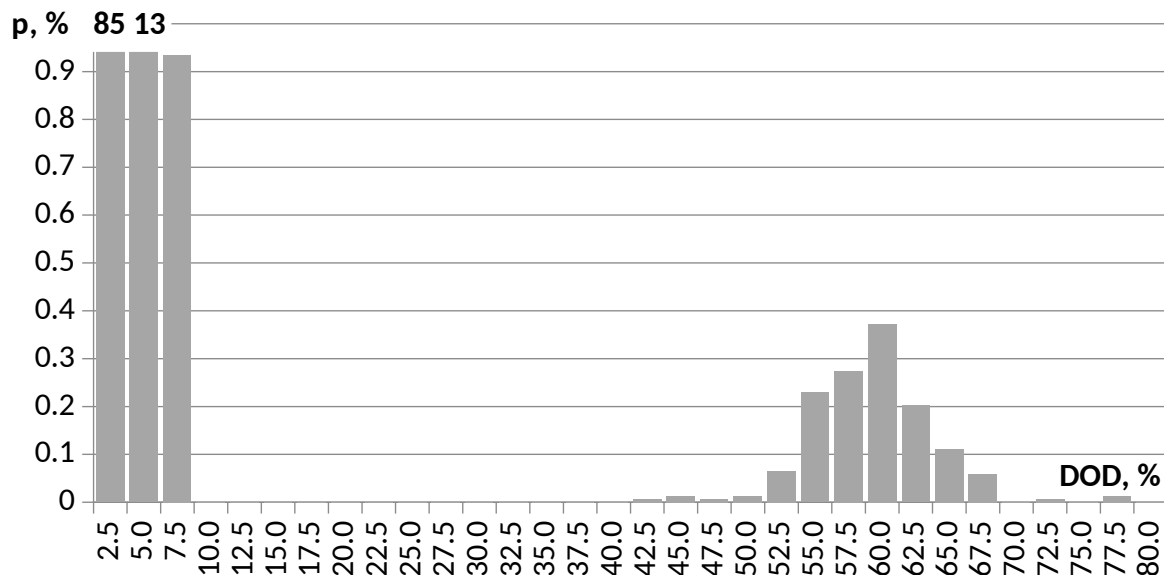


Рис. 2. Гистограмма плотности распределения относительной энергии заряда-разряда аккумулятора электробуса

Для определения энергоёмкости аккумулятора было найдено отношение плотности распределения энергии циклов $E(DOD)$ к зависимости перерабатываемого аккумулятором объема энергии от относительной глубины циклов $k(DOD)$. При перечисленных выше условиях полученная функция описывает плотность распределения циклов

заряда-разряда по их вкладу в износ аккумулятора, если принять влияние полного цикла за 100%. На рисунке 3 показана полученная в результате зависимость вклада циклов с различной глубиной разряда на ресурс аккумулятора для рассматриваемого транспортного средства.

Математическое ожидание полученного распределения (2) соответствует глубине разряда в цикле, являющимся эквивалентным по влиянию на износ аккумулятора. Подставляя (2) в (1), может быть получено выражение (3) для расчета циклического ресурса аккумулятора в заданном режиме эксплуатации. Так, в приведенном примере энергия циклов, связанных с зарядом аккумулятора на остановках, составляет 40...80% его полной энергоемкости, а связанных с приемом энергии торможения – до 8%. При этом вклад более глубоких, указанных первыми циклов в снижение ресурса аккумуляторной батареи составляет 82%.

$$DOD_{\text{экв}} = \int_0^{100\%} \frac{E(DOD)}{k(DOD)} DOD d(DOD) \quad (2)$$

$$N = k(DOD_{\text{экв}}) \cdot \frac{100\%}{DOD} N_{100} =$$

$$k \left(\int_0^{100\%} \frac{E(DOD)}{k(DOD)} DOD d(DOD) \right) \cdot \frac{100\%}{DOD} N_{100} \quad (3)$$

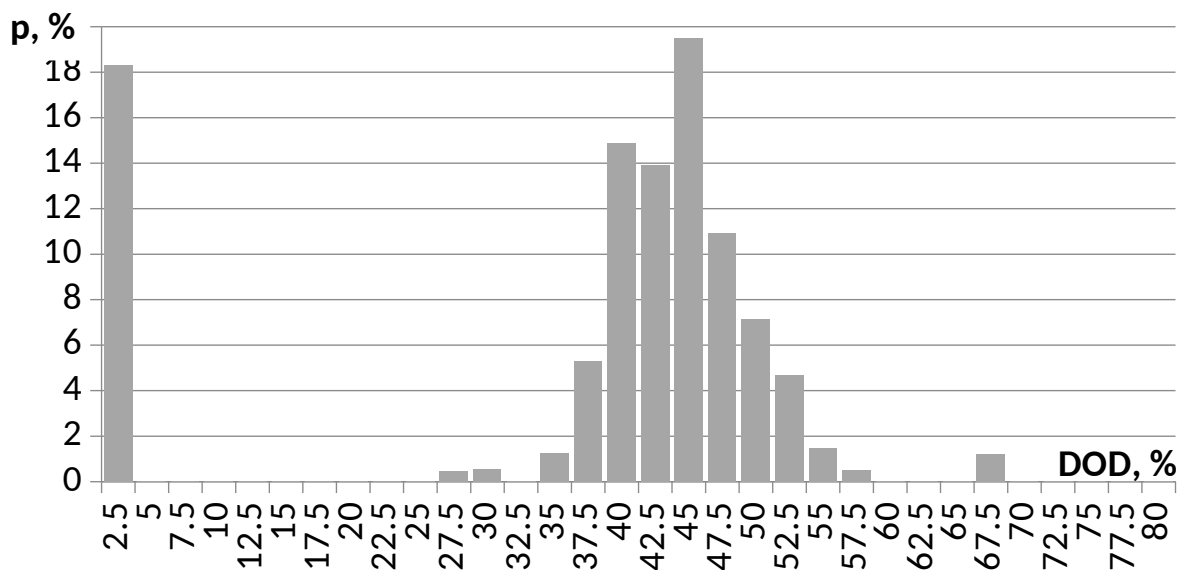


Рис. 3. Влияние циклов частичного заряда-разряда различной глубины на износ аккумулятора электробуса

Выводы. В работе выполнен обзор исследований о влиянии глубины

разряда литиевых аккумуляторов на их циклический ресурс, приведены выражения, описывающие зависимость предельного количества циклов заряда-разряда от их глубины (относительной энергии). Предложена методика оценки ресурса аккумулятора для произвольного набора циклов заряда-разряда различной энергии, заданного законом распределения. Сформулированы условия, ограничивающие возможность применения предложенной методики. В качестве примера её использования выполнен расчет ресурса для бортовой батареи электробуса на основании экспериментально полученного распределения энергии циклов глубины заряда-разряда. Предложенный метод позволит сформулировать требования к методам повышения эффективности использования литиевых аккумуляторов.

Список литературы:

1. Noshin, O. et al. Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model // Applied Energy. – 2014. – Vol. 113. – PP. 1575-1585. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.09.003.
2. Bocca, A. An equation-based battery cycle life model for various battery chemistries / A. Bocca, A. Sassone, D. Shin, A. Macii, E. Macii, M. Poncino // 2015 IFIP/IEEE International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC). – Daejeon, Korea (South). – 2015. – PP. 57-62. – DOI: 10.1109/VLSI-SoC.2015.7314392.
3. Smith, K. Life prediction model for grid-connected Li-ion battery energy storage system / K. Smith, A. Saxon, M. Keyser, B. Lundstrom, Ziwei Cao, A. Roc. – 2017 American Control Conference (ACC). – Seattle, WA, USA. – 2017. – PP. 4062-4068. – DOI: 10.23919/ACC.2017.7963578.
4. Xu, Bolun. Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment / Bolun Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson, D. S. Kirschen // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – Vol. 9. – No 2. – PP. 1131-1140. – DOI: 10.1109/TSG.2016.2578950.
5. Shi, Yuanyuan. A Convex Cycle-based Degradation Model for Battery Energy Storage Planning and Operation / Yuanyuan Shi, Bolun Xu, Yushi Tan, Baosen Zhang // 2018 Annual American Control Conference (ACC). – Milwaukee, WI, USA. – 2018. – PP. 4590-4596. – DOI: 10.23919/ACC.2018.8431814.
6. Spiridonov, E. A. Evaluation of energy recuperation efficiency for operating conditions of city electric transport [Text] / E. A. Spiridonov, M. V. Yaroslavtsev // proc. of 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). – Novosibirsk, Russia, 2016. – P. 61-64. – DOI:

10.1109/IFOST.2016.7884334. – EDN: WMYFSX

7. Аносов В. Н. Повышение эффективности функционирования тягового электропривода троллейбуса / В. Н. Аносов, В. М. Кавешников, М. В. Ярославцев // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 14-16. – EDN: TJJKWF

Информация об авторах:

Азаматов Мурат Токтарбекович, докторант PhD, НАО «Торайгыров Университет», Казахстан, 140000, г. Павлодар, ул. Ломова, д. 64.

Ярославцев Михаил Викторович, к.т.н., ассоциированный профессор (доцент), НАО «Торайгыров Университет», Казахстан, 140000, г. Павлодар, ул. Ломова, д. 64, myaroslav54@gmail.com