



Влияние тока нагрузки на внутреннее сопротивление герметизирован- ного свинцово- кислотного аккумулятора автономной ФЭУ

Рецензия эксперта на статью получена
10.04.2020 [Expert review on the article
received on April 10, 2020].

Введение

Солнечная энергия обладает рядом несомненных преимуществ по сравнению с другими энергоносителями и источниками энергии. В первую очередь энергия Солнца экологически безопасна, поскольку при работе солнечная электростанция не выделяет в окружающую среду вредные вещества. В настоящее время прослеживается мировой тренд децентрализации энергетики. Уход многих потребителей от исключительно централизованного энергоснабжения — общемировая тенденция. Для удовлетворения их потребностей в последние годы разработан целый ряд эффективных энерготехнологий, которые позволяют потребителям электроэнергии создавать собственные генерирующие установки, успешно конкурирующие с централизованным производством электроэнергии [1].

23 января 2015 года вышло Постановление Правительства РФ от 23 января 2015 года №47-ПП «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электрической энергии». С этого момента в стране заработал розничный рынок электроэнергии и мощности, полученной от возобновляемых источников.

Основными элементами автономных фотоэлектрических установок являются: солнечные модули, аккумуляторные батареи (АКБ), инверторы, а также контроллеры заряда/разряда АКБ [2]. Аккумуляторные батареи служат для накопления и хранения электрической энергии, получаемой от солнечных модулей. При этом аккумулятору приходится работать в так называемом «циклическом режиме»: днём — заряд, вечером и ночью — максимально возможный разряд.

Уход многих потребителей от исключительно централизованного энергоснабжения — общемировая тенденция

Аккумуляторы, применяемые в различных энергетических системах, различаются по номинальному напряжению, номинальной ёмкости, габаритам, типу электролита, ресурсу, скорости заряда, стоимости и рабочему диапазону температур. К аккумуляторам фотоэлектрических систем предъявляются повышенные требования по цикличности (количество выдерживаемых циклов «заряд-разряд»), саморазряду, диапазону рабочих температур и минимальному обслуживанию [3].

УДК 681.11.031.1. Научная специальность: 05.14.08.

Экспериментальное исследование влияния тока нагрузки на внутреннее сопротивление герметизированного свинцово-кислотного аккумулятора автономной фотоэлектрической установки

В. Г. Ильичев, магистрант, инженер, Научно-образовательный центр «Альтернативная энергетика», Астраханский государственный университет (АГУ);
Л. Х. Зайнутдинова, к.т.н., д.п.н., профессор, заведующая кафедрой электротехники, электроники и автоматики, физико-технический факультет АГУ (г. Астрахань)

Проведено экспериментальное исследование внутреннего сопротивления герметизированного свинцово-кислотного аккумулятора Delta GX 12-40, изготовленного по технологии GEL от тока нагрузки. Построена характеристика зависимости внутреннего сопротивления аккумулятора от тока нагрузки. Приведена полиномиальная аппроксимация полученной зависимости.

Ключевые слова: фотоэлектрическая установка, аккумулятор, ресурс аккумуляторной батареи, циклический режим, нагрузка, внутреннее сопротивление.

UDC 681.11.031.1. The number of scientific specialty: 05.14.08.

An experimental study of the effect of the load current on the internal resistance of a sealed lead-acid battery in an autonomous photovoltaic installation

V. G. Ilchev, graduate student, engineer of the "Alternative Energy Engineering" Scientific and Educational Center, Astrakhan State University (ASU); **L. Kh. Zainutdinova**, PhD, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head Department of Electrical Engineering, Electronics and Automation, Faculty of Physics and Technology of ASU (Astrakhan city)

In this work, we conducted an experimental study of the internal resistance of a sealed lead-acid battery Delta GX 12-40, manufactured using GEL technology from a load current. The characteristic of the dependence of the internal resistance of the battery on the load current is built. A polynomial approximation of the obtained dependence is given.

Key words: photovoltaic installation, battery, battery life, cyclic mode, load, internal resistance.

За последние годы разработка и производство солнечных модулей достигли высоких результатов. Так, КПД солнечных модулей с каких-то 5–7% поднялся до 14–18%, а у современных отечественных, выпускаемых Новочебоксарским заводом солнечных модулей — до 22,5%, а в сборке — до 18%. Также стоит отметить и значительное увеличение срока их эксплуатации (до 25 лет) [4].

В связи со значительным снижением цен на солнечные модули АКБ стали самым дорогостоящим элементом СЭС. Первоначальная стоимость АКБ достаточно велика и к тому же они имеют небольшой срок эксплуатации (до 12 лет). Из этого следует, что нужно обращать особое внимание на выбор АКБ, а также последующую правильную их эксплуатацию. Обычно в документации к АКБ производители указывают срок службы в буферном режиме и при идеальных условиях эксплуатации (температура +20°C, редкие неглубокие разряды, постоянный оптимальный заряд). Даже в резервной системе такие условия обеспечить нелегко.

В автономном режиме картина совершенно иная: непрерывно-циклический режим «заряд-разряд» обеспечивает ещё более тяжёлые условия работы аккумуляторной батареи.

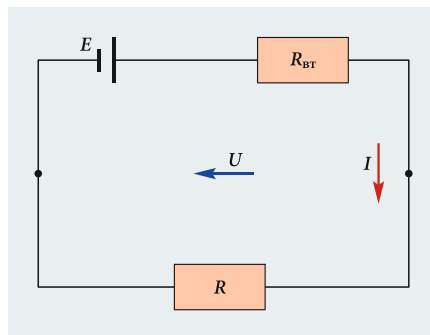
Одним из важных факторов, существенно влияющих на ресурс АКБ, используемых в автономных фотоэлектрических установках, является высокая температура при эксплуатации. Оптимальная для аккумулятора температура составляет 20–25°C. При температуре +35°C ресурс аккумулятора уменьшается в два раза [3].

Основная часть

Производители свинцово-кислотных аккумуляторов утверждают, что рекомендуемый диапазон эксплуатации АКБ составляет $22 \pm 1^\circ\text{C}$. Высокая температура (более +30°C) значительно сокращает срок службы аккумуляторов. Повышение температуры до +60°C является недопустимым. Это многократно сокращает срок службы. Желательно избегать эксплуатации аккумуляторов при температуре свыше +45°C.

В связи с изложенным возникает необходимость в разработке модели влияния температуры на долговечность и качество работы АКБ автономных фотоэлектрических установок.

В качестве примера в настоящей работе был рассмотрен герметизированный свинцово-кислотный аккумулятор Delta GX 12-40 напряжением 12 В и ёмкостью 40 А·ч, изготовленный по технологии GEL (композитный гель вместо электролита).



■ Рис. 1. Схема подключения аккумулятора под нагрузкой

Данный вид АКБ устойчив к глубоким разрядам. Корпус изготовлен из негорючего ABS пластика. Срок службы аккумулятора достигает 15 лет.

Герметизированные аккумуляторы гелевого типа предназначены для работы как в режиме постоянного подзаряда (бу-

ферный режим), так и в режиме «разряд-заряд» (циклический режим).

Для построения модели влияния температуры на долговечность и качество работы АКБ возникает потребность в экспериментальном определении значений внутреннего сопротивления аккумулятора. Условно, можно представить аккумулятор в виде двухполюсника с ЭДС E и внутренним сопротивлением $R_{вт}$.

На рис. 1 представлена схема подключения аккумулятора под нагрузкой.

При этом предполагается, что часть ЭДС аккумулятора падает на нагрузку, а другая часть — на внутреннем сопротивлении аккумулятора:

$$E = (R + R_{вт})I. \quad (1)$$

где E — ЭДС; $R_{вт}$ — внутреннее сопротивление АКБ; R — сопротивление нагрузки; I — ток нагрузки.

Напряжение на нагрузке:

$$U = RI = E - R_{вт}I. \quad (2)$$

Аккумулятор является принципиально нелинейным устройством и его внутреннее сопротивление не остаётся постоянным, а изменяется в зависимости от нагрузки, заряженности аккумулятора и многих других параметров:

$$R_{вт} = (E - U)/I. \quad (3)$$

Одним из важных факторов, существенно влияющих на ресурс АКБ, используемых в автономных фотоэлектрических установках, является высокая температура при эксплуатации



В настоящей работе проведено экспериментальное исследование зависимости внутреннего сопротивления $R_{вт}$ от тока нагрузки I .

Экспериментальные значения внутреннего сопротивления герметизированного свинцово-кислотного аккумулятора Delta приведены в табл. 1.

В результате данного проведённого экспериментального исследования была построена зависимость внутреннего сопротивления аккумулятора от тока нагрузки (синяя линия на рис. 2).

Полученная зависимость является нелинейной. С ростом тока нагрузки внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи снижается.

Также проведена аппроксимация полученной зависимости.

Согласно [5] полиномиальная аппроксимация является одним из наиболее распространённых способов аппроксимации. Заключается в представлении нелинейной характеристики в виде полинома (многочлена) n -й степени.

Функция, описывающая данный вид сглаживания, выглядит таким образом:

$$y = a_1 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n. \quad (4)$$

Посредством использования электронных таблиц MS Excel уравнение зависимости внутреннего сопротивления аккумулятора от тока нагрузки принимает следующий вид:

$$R_{вт} = 0,052I^2 - 0,3637I + 0,09013. \quad (5)$$

На рис. 2 красной линией показана нелинейная характеристика, построенная при использовании полиномиальной аппроксимации.

Коэффициент достоверности аппроксимации зависимости внутреннего сопротивления аккумулятора от тока нагрузки составил 0,9995, что подтверждает высокую точность аппроксимации.

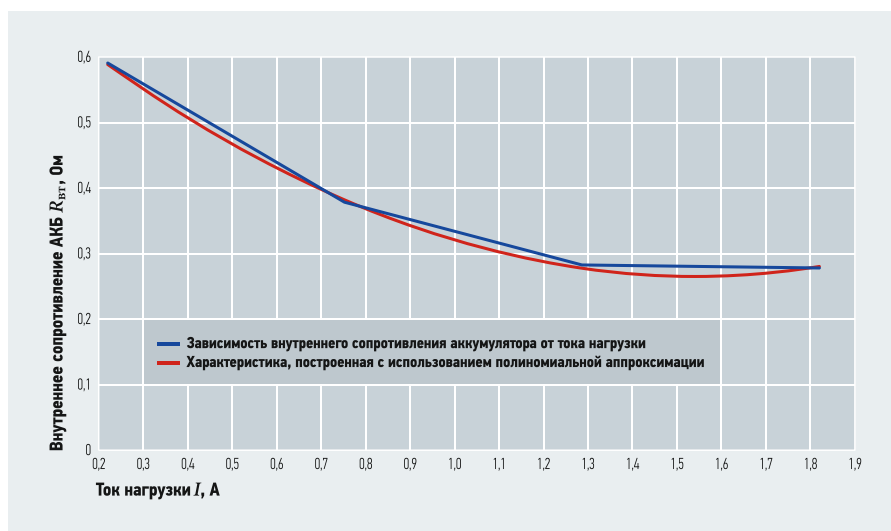


Рис. 2. Зависимость внутреннего сопротивления аккумулятора от тока нагрузки

Экспериментальные значения внутреннего сопротивления аккумулятора Delta

табл. 1

№	U , В	I , А	R	$E - U$	$R_{вт}$, Ом
1	13,03	0	∞	0	—
2	12,9	0,22	58,636	0,13	0,5909
3	12,75	0,74	17,229	0,28	0,3783
4	12,66	1,31	9,664	0,37	0,2824
5	12,51	1,87	6,689	0,52	0,2780

Заключение

В связи со значительным снижением цен на солнечные модули, АКБ стали самым дорогостоящим элементом СЭС. Первоначальная стоимость АКБ достаточно велика и к тому же они имеют небольшой срок эксплуатации по сравнению с солнечными модулями. Поэтому надо обращать особое внимание на выбор АКБ и на последующую правильную их эксплуатацию. Показано существенное сокращение срока службы АКБ с ростом температуры. Проведено экспериментальное определение значений внутреннего сопротивле-

ния герметизированного свинцово-кислотного аккумулятора Delta для автономных фотоэлектрических установок. Построена зависимость внутреннего сопротивления аккумулятора от тока нагрузки. Проведена аппроксимация полученной зависимости. Вид данной характеристики подтверждает нелинейность внутреннего сопротивления.

Полученная зависимость внутреннего сопротивления аккумулятора от тока нагрузки $R_{вт}(I)$ в дальнейшем будет использована для построения модели температурных режимов АКБ. ●



1. Теруков Е.И., Андроников Д.А., Малевский Д.А., Зайнутдинов Р.А., Ключарёв А.Ю., Братышев С.Н., Ильичев В.Г. Экспериментальное исследование влияния метеорологических факторов на выработку электроэнергии солнечными модулями в климатических условиях Астраханской области // Управление и высокие технологии, 2019. №2. С. 180–193.
2. Ахмедов А.С., Зайнутдинов Р.А. Электроснабжение частного дома с применением сетевой солнечной электростанции. Альтернативная энергетика в регионах России: Мат. молод. науч. конф. «АЭР-2018». 5–7 декабря 2018 г. / Под ред. Л.Х. Зайнутдиновой и М.Г. Тягунова. — Астрахань, 2018. С. 50–54.
3. Карлашук В.И. Элементы солнечных электростанций // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. №4. 31 с.
4. Грибков С.В. Перспективы развития ветроэнергетики больших мощностей в мире и России. Альтернативная энергетика в регионах России: Мат. молод. науч. конф. «АЭР-2018». 5–7 декабря 2018 г. / Под ред. Л.Х. Зайнутдиновой и М.Г. Тягунова. — Астрахань, 2018. С. 16–29.
5. Фёдоровский К.Ю. Аппроксимация полианалитическими многочленами. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. 197 с.

References — see page 62.

An experimental study of the effect of the load current on the internal resistance of a sealed lead-acid battery in an autonomous photovoltaic installation. Pp. 59–61.

Vladimir G. Ilichev, graduate student, engineer of the “Alternative Energy Engineering” Scientific and Educational Center, Astrakhan State University (ASU); **Larisa Kh. Zainutdinova**, PhD, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering, Electronics and Automation, Faculty of Physics and Technology of ASU

1. E.I. Terukov, D.A. Andronikov, D.A. Malevskij, R.A. Zajnutdinov, A.Ju. Kljucharev, S.N. Bratyshev, V.G. Il'ichev. *Jeksperimental'noe issledovanie vlijaniya meteorologicheskikh faktorov na vyrabotku jelektroenergii solnechnymi moduljami v klimaticeskikh uslovijah Astrahanskoj oblasti* [An experimental study of the influence of meteorological factors on the generation of electricity by solar modules in the climatic conditions of the Astrakhan region]. *Upravlenie i vysokie tehnologii* [“Management and high technology” Magazine]. 2019. No. 2. Pp. 180–193. [In Russian]
2. A.S. Ahmedov, R.A. Zajnutdinov. *Jeletrosnabzhenie chastnogo doma s primeneniem setevoj solnechnoj jelektrostantsii* [Power supply of a private house using a solar network]. *Al'ternativnaja jenergetika v regionah Rossii: Materialy molodezhnoj nauchnoj konferencii “AJeR-2018”* [Alternative energy in the regions of Russia: Proc. of the “AER-2018” Youth Scientific Conference]. December 5–7, 2018. Edited by L.Kh. Zajnutdinova, M.G. Tjagunov. Astrakhan. 2018. Pp. 50–54. [In Russian]
3. V.I. Karlashhuk. *Jelementy solnechnyh jelektrostantsij* [Elements of solar power plants]. *Inzhenernyj vestnik. MGTU im N.E. Baumana* [Engineering Bulletin. Bauman Moscow State Technical University]. 2014. No. 4. 31 p. [In Russian]
4. S.V. Gribkov. *Perspektivy razvitiya vetrojenergetiki bol'shih moshhnostej v mire i Rossii* [Prospects for the development of high-power wind energy in the world and in Russia]. *Al'ternativnaja jenergetika v regionah Rossii: Materialy molodezhnoj nauchnoj konferencii “AJeR-2018”* [Alternative energy in the regions of Russia: Proc. of the “AER-2018” Youth Scientific Conference]. December 5–7, 2018. Edited by L.Kh. Zajnutdinova, M.G. Tjagunov. Astrakhan. 2018. Pp. 16–29. [In Russian]
5. K.Ju. Fedorovskij. *Approksimacija polianaliticheskimi mnogochlenami* [Approximation by polyanalytic polynomials]. Moscow. *IPM im. M.V. Keldysa* [Keldysh Institute of Applied Mathematics]. 2016. 197 p. [In Russian]