

УДК 620.9:621.355.2:621:355.5:621.354.324.1:621.311.2

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.008

Универсальная модель срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах

Карамов Дмитрий Николаевич¹, Муфтахов Ильдар Ринатович¹, Потапов Василий Васильевич², Сыромятников Антон Анатольевич², Шушпанов Илья Николаевич²

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

Россия, г. Иркутск, *dmitriy.karamov@mail.ru*

² Иркутский национальный исследовательский технический университет

Россия, Иркутск,

Аннотация. В данной работе представлена универсальная методика расчета срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах. Описывается метод категоризации аккумуляторных батарей и его важность при формировании потенциально-возможных вариантов компоновки системы аккумулирования. Режимы работы аккумуляторных батарей рассчитываются с помощью хронологического метода, который позволяет определить основные показатели для каждого часа рассматриваемого периода. Кроме того, вводятся понятия частичного цикла и локально-минимального состояния заряда аккумуляторной батареи. Эти показатели необходимы для правильной оценки количества циклов батареи до ее замены. После определения предельного количества циклов до замены и среднегодового количества циклов заряд/разряд можно определить срок службы аккумуляторной батареи. Данная методика была использована в 2015 году при проектировании фотоэлектрической системы «Верхняя Амга» (Республике Якутия). Результаты показали, что лучше всего использовать свинцово-карбоновые аккумуляторные батареи суммарной емкостью 144 кВт·ч. Полученная емкость позволяет использовать аккумуляторные батареи в тяжелых циклических режимах работы фотоэлектрической системы. Представленная методика является универсальной и может использоваться в различных задачах системного характера в области энергетики.

Ключевые слова: автономные фотоэлектрические системы, аккумуляторные батареи, срок службы, частичный цикл, глубина разряда

Цитирование: Карамов Д.Н. Универсальная модель срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах / Д.Н. Карамов, И.Р. Муфтахов, В.В. Потапов, А.А. Сыромятников, И.Н. Шушпанов. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 2(26). – С. 85-96. – DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.008.

Введение. В течение последнего десятилетия мировой опыт показал, что комбинированное использование возобновляемых источников энергии, аккумуляторных батарей и традиционных энергетических установок является экономически выгодным способом обеспечения потребителей в автономных энергосистемах [1, 2]. Особое значение возобновляемые источники энергии приобрели при электрификации удаленных сельских территорий, не имеющих связи с централизованными электроэнергетическими системами [3-5].

Оптимизация конфигурации, состава оборудования и установленной мощности является одной из основных задач при использовании возобновляемых источников энергии и аккумуляторных батарей [6]. Решение такой задачи позволяет определить оптимальное техническое решение, при котором достигаются приемлемые значения целевой функции.

Как правило, целевая функция представлена нормированной стоимостью энергии (Levelized cost of energy (LCOE), \$/кВт·ч) [7,8]. LCOE хорошо зарекомендовала себя при решении задачи оптимизации состава оборудования в автономных энергетических системах. Преимущества LCOE заключается в его универсальности и возможности интеграции любого другого технологического показателя в денежный эквивалент [9]. Например, показатели надежности энергетической системы можно рассматривать в части финансовых штрафов за

недоотпуск электроэнергии потребителям. Аналогичным образом могут учитываться выбросы углекислого газа и других загрязняющих веществ, превышающие предельно допустимые нормы. Отдельного упоминания заслуживают вопросы реконструкции и замены оборудования автономных энергетических систем на протяжении всего срока эксплуатации. Поскольку LCOE рассчитывается на весь период функционирования энергокомплекса, то стоимость реконструкции системы и замены основного оборудования автономного энергокомплекса может быть определено с учетом дисконтирования для конкретного года рассматриваемого периода.

Мероприятия, направленные на реконструкцию автономной энергетической системы и замену основного оборудования, зависят от срока эксплуатации конкретного агрегата, его технического состояния и ремонтпригодности. Крайне важно учитывать вышеперечисленные факторы для решения сложных практических задач, поскольку они оказывают существенное влияние на результат оптимизации.

Аккумуляторные батареи имеют существенную долю в суммарных капиталовложениях в автономных энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии. В среднем эта доля составляет от 30% до 45% в зависимости от используемого типа аккумуляторных батарей. Следовательно, учет количества замен аккумуляторных батарей оказывает существенное влияние на показатель LCOE и результат оптимизации состава оборудования.

В данной статье предлагается модель для расчета срока службы аккумуляторных батарей в автономных энергетических системах с возобновляемой генерацией. Научная новизна настоящего исследования заключается в разработке простой, но надежной методики расчета срока службы аккумулирующих устройств. Данная модель включает многолетние метеорологические ряды; подробные математические модели основных элементов автономных энергетических систем; методику категоризации аккумуляторных батарей; технические характеристики основного и вспомогательного оборудования.

1. Аккумуляторные батареи в автономных энергетических системах.

Аккумуляторные батареи в автономных энергетических системах являются стабилизирующим элементом, работающим в циклическом режиме. Имея малую величину инерции, аккумуляторные батареи могут запасать избыточную энергию и отдавать ее в моменты дефицита, поддерживая тем самым необходимую частоту энергосистемы.

Дизельные электростанции могут использоваться в качестве резервного источника электроэнергии при интеграции аккумуляторных батарей в автономные энергетические системы с возобновляемой генерацией [10]. В таких условиях режим работы дизельных электростанций зависит от состояния заряда аккумуляторных батарей. При этом дизельная электростанция включается на полную мощность, обеспечивая электроэнергией непосредственно потребителя и выполняя заряд аккумуляторных батарей. Такой режим работы позволяет дизельным электростанциям значительно сократить время использования и расход топлива.

При правильном выборе типа аккумуляторных батарей и суммарной емкости значительно улучшаются показатели устойчивости и надежности автономных энергетических систем. Следовательно, необходимо различать, какие типы аккумуляторных батарей можно использовать в конкретных условиях эксплуатации, а какие нельзя. Эта важная и сложная проблема часто недооценивается и приводит к катастрофическим результатам во время реальной эксплуатации.

2. Определение возможных вариантов компоновки. В статье [11] представлена уникальная методика категоризации аккумуляторных батарей в зависимости от условий эксплуатации и конфигурации генерирующего оборудования. Данная методика основана на анализе показателей работы большого количества реальных автономных энергосистем с

возобновляемыми источниками энергии и аккумуляторными батареями. Она включает в себя шесть основных показателей в зависимости от режимов работы аккумуляторной батареи в течение года. Каждый показатель имеет свои единицы измерения и соответствующую шкалу оценок от 1 до 5. По итогам данных оценок строится радиальная диаграмма. Также дано описание шести основных категорий, каждая из которых имеет свою радиальную диаграмму. Кроме того, подробно представлены процессы деградации в аккумуляторных батареях и их связь с основными показателями и оценками. Для каждой категории представлены только те типы аккумуляторных батарей и другого вспомогательного оборудования, которые можно использовать в данных условиях эксплуатации.

В работе [12] представлена интеграция методики категоризации аккумуляторных батарей в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических систем. Следовательно, при решении задачи оптимизации предлагаются такие варианты компоновки аккумуляторных батарей и дополнительного оборудования, максимально соответствующие заданным условиям эксплуатации. В таком случае минимизируются процессы деградации аккумуляторных батарей. Кроме того, эта методика заранее исключает такие типы аккумуляторных батарей, которые не соответствуют данным условиям эксплуатации, приводящим к быстрой потере располагаемой емкости.

3. Замена аккумуляторных батарей. На практике большое значение имеет учет количества замен аккумуляторных батарей за весь период эксплуатации автономного энергетического комплекса. Заслуживают внимания исследования, в которых предлагаются математические модели замены аккумуляторных батарей. Эти модели основываются на определении эксплуатационных показателей аккумуляторного звена. Одним из способов является определение среднегодового числа циклов заряд/разряд [13]. Также заслуживает упоминания модель *RainFlow*, основанная на определении количества циклов заряд/разряд в зависимости от глубины разряда [14]. Этот показатель делится на определенное количество интервалов, соответствующих определенному количеству циклов заряд/разряд. Таким образом определяется среднегодовое количество циклов заряд/разряд и предельное число циклов, соответствующих замене аккумуляторной батареи. Одной из наиболее сложных моделей является модель Schiffer [15], основанная на определении эксплуатационных показателей, влияющих на срок службы аккумуляторной батареи. В работе [16] утверждается, что модели, описанные в [13,14], значительно завышают срок службы батареи.

4. Описание методики. Данный раздел содержит словесное описание рассматриваемой методики. Общеизвестные исследования или опубликованные работы авторов приводятся ниже в качестве ссылок и кратким словесным описанием.

4.1. Анализ климатических показателей. Генерация от возобновляемых источников энергии зависит от климатических показателей таких как суммарная солнечная радиация, скорость ветра, температура / плотность воздуха.

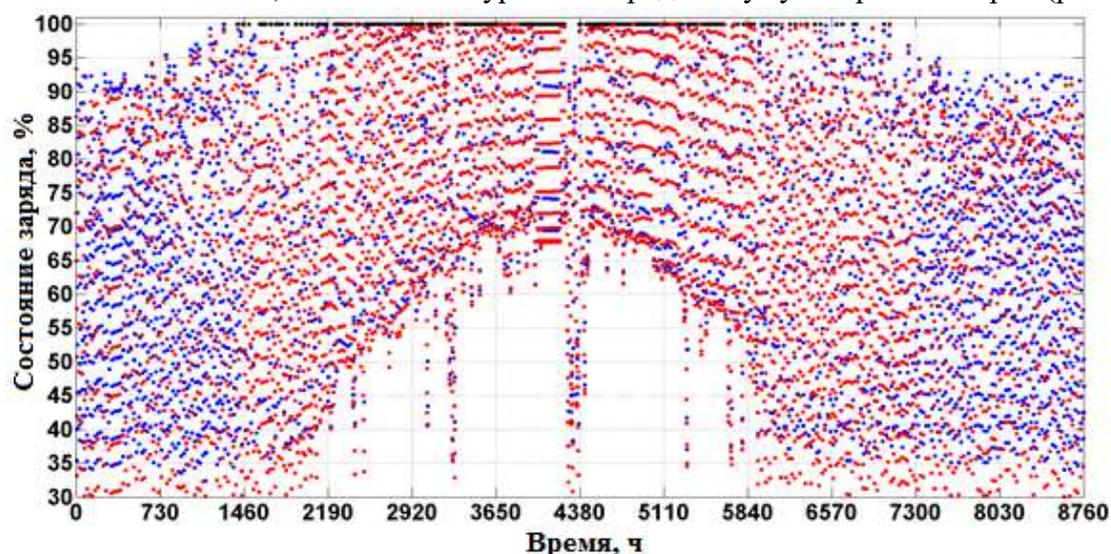
Многолетние метеорологические ряды часто используются для моделирования скорости ветра, суммарной солнечной радиации, температуры воздуха и многих других метеорологических параметров. В работе [17] подробно описана методика интеграции в энергетические исследования многолетних метеорологических рядов форматов FM 12 Synop и METAR, представлены схемы обработки и анализа данных. В статье [18] представлена методика моделирования суммарной солнечной радиации с использованием общедоступных многолетних метеорологических рядов. Моделирование основано на ретроспективных данных с использованием тандема математических моделей Iqbal и Kasten/Czeplak.

В результате получается 15-20-летняя последовательность метеорологических параметров с дискретным шагом один час и типичный метеорологический год.

4.2. Моделирование аккумуляторных батарей в автономных энергетических системах. Моделирование режимов работы автономной энергетической системы основано на хронологическом моделировании относительно каждого часа расчетного периода [1,6,10]. Хронологический метод расчета является усовершенствованной версией имитационного моделирования. Значения выходной мощности, уровня электрической нагрузки потребителя и электрических потерь в сети являются известными параметрами автономной энергосистемы. Учитывая стохастический характер генерации возобновляемых источников энергии, знакопеременная функция мощности системы может принимать как положительное, так и отрицательное значение [6,12,16]. Положительная область указывает на избыток мощности, тогда как отрицательная область означает дефицит. Наличие аккумуляторных батарей решает эту проблему. В [12, с. 114-116] авторы статьи дают исчерпывающее описание универсальной математической модели аккумуляторных батарей с учетом эксплуатационно-технических ограничений. Последние характеризуются скоростью заряда и разряда в зависимости от типа аккумуляторных батарей.

4.2.1. Полный и частичный цикл заряд/разряд. Техническая документация аккумуляторных батарей, как правило, содержит определенный перечень характеристик, описывающих тот или иной тип оборудования. Эти характеристики включают следующее: срок службы в зависимости от глубины разряда, а также уровень напряжения для каждого состояния заряда аккумуляторной батареи.

Срок службы с учетом глубины разряда указывает, сколько циклов до замены аккумуляторная батарея может выполнить при заданной глубине разряда. Глубина разряда зависит от типа используемых аккумуляторов. Например, стационарные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи (FLA, OPzS, GroE), имеют максимальную глубину разряда 80%, при которой предельное количество циклов в среднем не превышает 1500-2000. Следовательно, под полным циклом понимается процесс, при котором аккумуляторная батарея разряжается до рекомендуемой глубины разряда, т. е. процента от ее номинальной емкости, а затем полностью заряжается к исходному состоянию. Однако в автономных энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии знакопеременная функция мощности часто меняется, что влияет на уровень заряда аккумуляторной батареи (рис. 1).



Цвета: заряд (красный), разряд (синий), полный заряд 100% (черный)

Рис. 1. Изменение в течение года состояния заряда батареи фотоэлектрической системы

Как видно из рис. 1, невозможно проследить полный цикл заряда/разряда по последовательным процессам во всем диапазоне глубины разряда. Эти условия показали

необходимость введения понятия частичного цикла, характеризующего изменение процесса заряд/разряд при различных значениях состояния заряда аккумуляторной батареи. Это позволит отслеживать, до какого частичного состояния аккумуляторные батареи заряжались, а затем разряжались до определенного значения. Например, аккумуляторные батареи в фотоэлектрических системах наиболее активно используются ночью или в пасмурные дни весенне-летний период. Поскольку аккумуляторные батареи в этот период разряжаются незначительно из-за низкого уровня электрической нагрузки (ночной режим), срок службы аккумуляторов за это время почти не уменьшается.

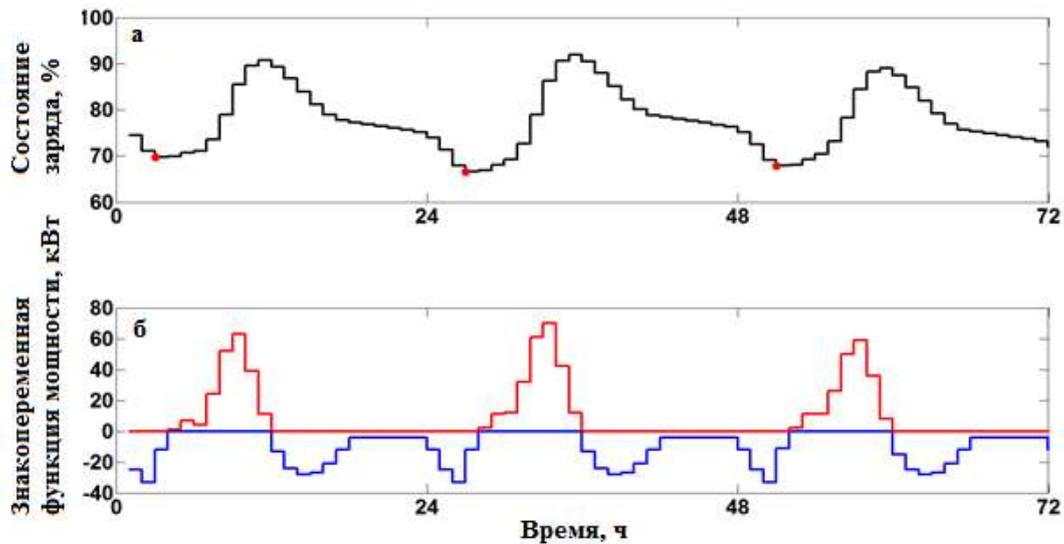
4.2.2. Моделирование частичных циклов. При моделировании частичного цикла необходимо отслеживать поведение знакопеременной функции мощности системы и состояние заряда аккумуляторной батареи. Для простоты дадим словесное описание алгоритма моделирования частичного цикла. Следует отметить, что в процессе моделирования учитываются эксплуатационно-технические ограничения.

1. Если знакопеременной функции мощности системы в момент времени t отрицательная, то аккумуляторная батарея разряжается. Этот процесс может продолжаться до тех пор, пока батарея не разрядится до минимального порога.
2. Если аккумуляторная батарея продолжала разряжаться в течение определенного периода времени t , а затем процесс разряда сменился на заряд, батарея будет заряжаться до тех пор, пока знакопеременной функции мощности системы будет положительной.
3. При выполнении условий (1) и (2) и полном 100% заряде аккумуляторной батареи знакопеременная функция мощности системы принимает значение электрической нагрузки потребителя, тем самым напрямую обеспечивая потребителей электроэнергией от фотоэлектрической системы без использования аккумуляторных батарей. Этот процесс часто происходит в автономных фотоэлектрических системах в весенне-летний период, когда электрическая нагрузка имеет низкие значения, а генерация – высокие.
4. Когда аккумуляторная батарея разряжалась (1) в течение определенного промежутка времени t , а затем заряжалась (2) до определенного значения (или до 100% состояния заряда (3)), то этот процесс называется неполным циклом. Окончание цикла определяется в тот момент, когда процесс разряда (1) происходит снова после выполнения всех вышеперечисленных условий, что свидетельствует о завершении предыдущего цикла и начале нового частичного цикла. В качестве примера рассмотрим поведение состояния заряда аккумуляторной батареи в течение трех дней и знакопеременной функции мощности для автономной фотоэлектрической системы. На рис. 2 представлены, а) изменение состояния заряда аккумулятора, %; и б) знакопеременная функция мощности, кВт.

Как видно на рис. 2, аккумуляторная батарея заряжается днем (красная линия) и разряжается ночью (синяя линия). Красные точки (рис. 2а) показывают конец предыдущего частичного цикла и начало следующего.

4.2.3. Характеристика срока службы аккумуляторных батарей в зависимости от глубины разряда. Кривая срока службы аккумуляторных батарей в зависимости от глубины разряда - это характеристика, определяющая количество циклов до отказа при различной глубине разряда. При этом минимальное значение состояния заряда аккумуляторной батареи можно определить в зависимости от продолжительности частичного цикла и глубины разряда. Для этого вводится понятие локально-минимального состояния заряда

аккумуляторной батареи. Локально-минимальное значение соответствует наименьшему уровню заряда аккумуляторной батареи для каждого частичного цикла.

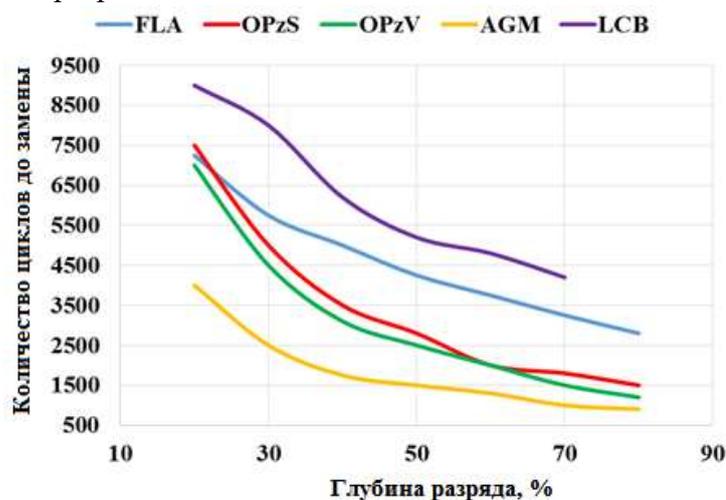


Цвета: заряд (красный), разряд (синий),

Рис. 2. а) изменение состояния заряда батареи, %, б) функция переменной мощности, кВт

Учитывая, что частичный цикл это малая составляющая всей характеристики состояния заряда аккумуляторной батареи, то его наименьшее значение является локальным. После определения локально-минимального значения состояния заряда аккумуляторной батареи для каждого частичного цикла можно рассчитать его среднегодовое значение. Следовательно, эта величина зависит от знакопеременной функции мощности и режимов функционирования. Использование среднегодового локально-минимального значения состояния заряда аккумуляторной батареи является оценкой наихудшего случая, которая также называется оценкой снизу (пессимистичной оценкой).

Следующим шагом является определение предельного количества циклов до замены путем сравнения полученного среднегодового значения локально-минимального состояния заряда аккумуляторной батареи с характеристикой срока службы в зависимости от глубины разряда. На рис. 3 показаны типовые характеристики срока службы аккумуляторных батарей в зависимости от глубины разряда.



Расшифровка аккумуляторных батарей: FLA – залитая свинцово-кислотная; LCB – свинцово-карбоновая; OPzS – залитая свинцово-кислотная с цилиндрическими пластинами; OPzV – гелеобразная свинцово-кислотная с цилиндрическими пластинами; AGM – свинцово-кислотная с абсорбированным электролитом

Рис. 3. Срок службы в зависимости от глубины разряда для различных типов аккумуляторных батарей

Таким образом, можно выявить следующую закономерность: чем выше суммарная емкость аккумуляторных батарей, тем выше среднегодовое значение локального минимального состояния заряда, что естественно увеличивает число циклов до отказа.

4.2.4. Расчет срока службы аккумуляторной батареи. Помимо среднегодового локально-минимального состояния заряда батареи и предельного числа циклов до замены, необходимо определить среднегодовое число циклов заряд/разряд. Для этого необходимо рассчитать количество энергии, поступающей в аккумуляторную батарею за рассматриваемый период времени. Далее полученное значение необходимо разделить на общую установленную емкость аккумуляторной батареи. Это дает возможность рассмотреть все частичные циклы за рассматриваемый период и привести их к общему числу. Можно наблюдать следующую закономерность: чем выше суммарная установленная емкость аккумуляторных батарей, тем меньше среднегодовое количество циклов заряд/разряд.

Для определения срока службы аккумуляторных батарей необходимо предельное количество циклов до замены, зависящих от среднегодового значения локально-минимального состояния заряда, разделить на среднегодовое число циклов заряд/разряд.

На рис. 4 представлена упрощенная блок-схема, описывающая алгоритм расчета срока службы аккумуляторных батарей.

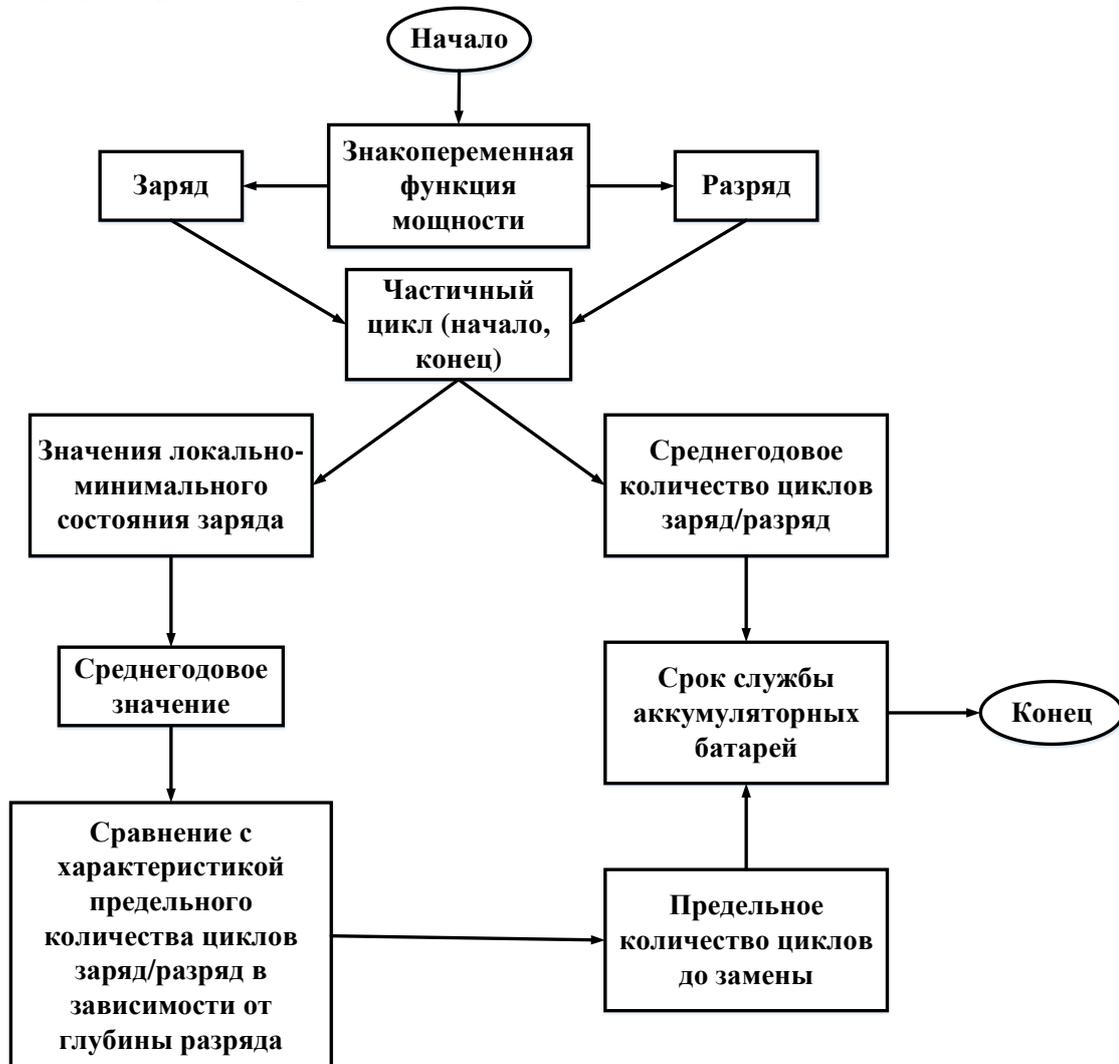


Рис. 4. Упрощенная блок-схема, описывающая алгоритм расчета срока службы аккумуляторных батарей

5. Реализация на практике. В данном разделе описаны результаты использования данной методики на практике. Рассмотрим в качестве примера основные результаты, полученные в 2015 году при проектировании фотоэлектрической системы «Верхняя Амга» (Алданский район, Республика Якутия).

До 2015 года данная автономная энергетическая система имела только дизельную электростанцию. В качестве основного энергетического оборудования использовались два дизель-генератора мощностью 25 кВт. Наибольшая (15 кВт) и наименьшая (10 кВт) электрические нагрузки (по данным 2015 года) приходится на зимнее и летнее время соответственно. Годовой расход топлива чисто на дизельную генерацию составлял 35 тонн в год.

В 2015 году было принято решение построить фотоэлектрическую систему с аккумуляторными батареями, чтобы снизить количество потребляемого дизельного топлива и увеличить количество часов подачи электроэнергии потребителям с 10 часов в сутки до круглосуточного.

Согласно исходного технического задания основными критериями были: экономия дизельного топлива (тонн в год), срок службы аккумуляторной батареи (количество лет) и нормируемая стоимость энергии (Руб./кВт·ч). Предпочтение отдавалось необслуживаемым аккумуляторным батареям, учитывая, что нормативные документы жестко регламентируют использование обслуживаемых аккумуляторов с жидким электролитом. Использование необслуживаемых аккумуляторных батарей снизило расходы на ежегодное техническое обслуживание.

На первом этапе использовались суммарная солнечная радиация, скорость ветра, температура воздуха и многие другие климатические параметры на рассматриваемой локации.

Целью второго этапа было моделирование автономной фотоэлектрической системы и решение задачи категоризации аккумуляторных батарей. После был составлен перечень аккумуляторных батарей, отвечающих требованиям сложных циклических режимов работы фотоэлектрической системы. В перечень вошли следующие аккумуляторные батареи: OPzS, OPzV, классические затопленные аккумуляторные батареи с повышенным техническим ресурсом (FLA) и свинцово-карбоновые аккумуляторные батареи (LCB). В частности, для OPzS и FLA была рекомендована система циркуляции электролита. Поскольку изначально рассматривались необслуживаемые аккумуляторные батареи, то впоследствии в задачу оптимизации состава оборудования были включены только аккумуляторные батареи типов OPzV и LCB.

В конечном итоге для проекта был выбран следующий состав оборудования: солнечная электростанция (36 кВт), солнечные инверторы (36 кВт), свинцово-карбоновые аккумуляторные батареи (144 кВт·ч) и батарейные инверторы (24 кВт). Годовая расчетная генерация составляет 103000 кВт·ч. Из них 44000 кВт·ч обеспечивает солнечная электростанция, остальное дизельная. Ежегодно на аккумуляторные батареи поступает около 22000 кВт·ч. Предельное количество циклов до замены составляет 4200, а среднегодовое количество циклов заряд/разряд имеет значение от 150 до 210 в год. В случае увеличения электрической нагрузки поселка в 2,5 раза расчетный срок службы аккумуляторной батареи составляет 15 лет.

Полученный состав оборудования обеспечивает значительную экономию дизельного топлива (более 40%), длительный срок службы аккумуляторных батарей и снижение нормированной стоимости энергии с 34 до 18 руб./кВт·ч.

Данная система работает с 2016 года. Электрическая нагрузка за этот период увеличилась более чем в 2 раза. Поскольку такой сценарий рассматривался при решении задачи, были выбраны аккумуляторные батареи достаточной емкости, выдерживающие сложные циклические режимы работы.

Заключение. В данной работе представлена методика расчета срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах. Дается описание категоризации аккумуляторных батарей и их важности при определении потенциально-возможных вариантов компоновки. Методика категоризации аккумуляторных батарей позволяет определить такие типы аккумуляторных батарей, которые можно использовать в данных условиях эксплуатации, тем самым исключая, заведомо неподходящие. Предлагаемая методика основана на хронологическом моделировании режимов работы автономных энергетических систем относительно каждого часа расчетного периода. Также в статье описаны основные режимы работы аккумуляторных батарей и их характеристики. Вводятся понятия частичного цикла и локально-минимального состояния заряда аккумуляторных батарей. Определение среднегодового значения локально-минимального состояния заряда аккумуляторных батарей и сравнение его с характеристикой срока службы в зависимости от глубины разряда позволяет определить предельное количество циклов до замены.

Данная методика была использована в 2015 году при проектировании фотоэлектрической системы «Верхняя Амга» (Алданский район, Республика Якутия). Решением задачи категоризации был выявлен ряд типов аккумуляторных батарей, удовлетворяющих требованиям эксплуатации. Расчетный срок службы аккумуляторных батарей составляет до 15 лет.

В настоящее время аккумуляторные батареи вместе с солнечной электростанцией полностью обеспечивают потребности местных потребителей в электроэнергии с марта по октябрь. В этот период дизельная электростанция работает только в пасмурные дни. Представленная методика универсальная и может быть использована для решения задач оптимизации состава оборудования и установленной емкости аккумуляторных батарей.

Благодарности. данная работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-48-383004.

Список источников

1. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic–diesel–battery stand-alone systems minimising system weight. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
2. Li F.F., Qiu J. Multi-objective optimization for integrated hydro–photovoltaic power system. *Applied Energy*, 2016, vol. 167, pp. 377–384.
3. Govinda R., Timilsina B., Kalim U.S. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States. *Energy Policy*, 2016, vol. 98, pp. 653–662.
4. Mollik S., Rashid M.M., Hasanuzzaman M., et al. Prospects, progress, policies, and effects of rural electrification in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 65, pp. 553–567.
5. Afsharzade N., Papzan A., Ashjaee M., et al. Renewable energy development in rural areas of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 65, pp. 743–755.
6. Karamov D. N., Minarchenko I. M., Kolosnitsyn A. V., Pavlov N. V. Installed capacity optimization of autonomous photovoltaic systems under energy service contracting. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 240, 114256
7. Bilal B.O., Sambou V., Kebe C.M.F., et al. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO² Emissions. *Energy Procedia*, 2014, vol. 195, pp. 1636–1647.
8. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, pp. 4470–4482.

9. Karamov D.N., Suslov K.V. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, Suppl. 1 pp. 349–358.
10. Bernal-Agustin J. L., Dufo-Lopez R., Rivas-Ascaso D. M. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. *Renewable Energy*, 2006, vol. 31, pp. 2227–2244.
11. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R., et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, pp. 1409–1425.
12. Karamov D.N. Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 113–130.
13. Bernal-Agustin J. L., Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, pp. 2111–2118.
14. Green HJ, Manwell J. HYBRID2 – A Versatile Model of the Performance of Hybrid Power Systems In: *Proceedings of WindPower'95*, 1995, Washington DC.
15. Schiffer J., Sauer D. U., Bindner H., et al. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems. *Journal of Power Sources*, 2007, vol. 168, pp. 66–78.
16. Dufo-López R., Lujano-Rojas J. M., Bernal-Agustín J. L. Comparison of different lead–acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems. *Applied Energy*, 2014, vol. 115, pp. 242–253.
17. Karamov D.N. Formation of initial meteorological arrays with the use of long-term series FM 12 Synop and METAR in systems energy studies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 69–88.
18. Karamov D.N. Mathematical modeling of solar irradiance based on open access long-term meteorological observation data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28–37.

Карамов Дмитрий Николаевич, 1990 года рождения, образование высшее по специальности *Электроснабжение*, полученное в *ИрГТУ*, к.т.н., занимаемая должность: *старший научный сотрудник лаборатории исследования энергетических установок, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН*, AuthorID: 905773, SPIN-код: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, *dmitriy.karamov@mail.ru*, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Муфтахов Ильдар Ринатович, 1990 года рождения, образование высшее по специальности *Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем*, полученное в *ИрГУПС*, занимаемая должность: *инженер-исследователь лаборатории исследования операций, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН*. AuthorID: 738846, SPIN-код: 2655-9802, ORCID: 0000-0003-2516-459X, *ildar_sm@mail.ru*, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Потапов Василий Васильевич, 1948 года рождения, образование высшее по специальности *Инженер электрофизик*, полученное в *Томском политехническом институте имени Кирова*, к.т.н., занимаемая должность: *доцент кафедры электроснабжения и электротехники ИРНИТУ*, AuthorID: 740448, SPIN-код 1011-4444, ORCID: 0000-0002-3150-088X, *PV1511@mail.ru*, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Сыромятников Антон Анатольевич, 1989 года рождения, образование высшее по специальности *Экономика и управление на предприятии (в энергетике)*, полученное в *ИрГТ*, занимаемая должность: *техник на кафедре электроснабжения и электротехники ИРНИТУ*, ORCID: 0000-0002-9720-6456, *acad1killer@rambler.ru*, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Шушпанов Илья Николаевич, 1986 года рождения, образование высшее по специальности *Электроснабжение*, полученное в *ИрГТУ*, к.т.н., занимаемая должность: *доцент кафедры электроснабжения и электротехники ИРНИТУ*. AuthorID: 678997, SPIN-

код: 5280-0644, ORCID: 0000-0001-7121-7651, *ilis83@mail.ru*, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

UDC 620.9:621.355.2:621:355.5:621.354.324.1:621.311.2

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.008

Methodology for calculating the lifetime of storage batteries in autonomous photovoltaic systems

Dmitriy N. Karamov¹, Ildar R. Muftahov¹, Vasilij V. Potapov², Anton A. Syromyatnikov², Ilya N. Shushpanov².

¹ Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Russia, Irkutsk, *dmitriy.karamov@mail.ru*

² Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk

Abstract. This paper presents a versatile and simple methodology for calculating the lifetime of storage batteries in autonomous photovoltaic systems. A description is given of battery categorization and its importance in establishing potential configuration options. Battery operating modes are modeled using the chronological modeling method which defines the mode indicators with respect to every hour of the period under consideration. The notions of partial cycle and local minimum state of battery charge are introduced. These indicators are necessary for the correct estimate of the number of battery cycles to failure. After identifying the number of cycles to failure and the average annual number of cycles, it is possible to calculate storage battery lifetime. This methodology was used in 2015 when designing and setting up Verkhnyaya Amga, a photovoltaic system in the Republic of Yakutia. The results showed that it is best to use lead-carbon batteries with a total capacity of 144 kW·h.

Keywords: autonomous photovoltaic systems, storage batteries, lifetime, partial cycle, depth of discharge

Acknowledgement: the reported study was funded by RFBR and the Government of the Irkutsk Region, project number 20-48-383004.

References

1. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
2. Li F.F., Qiu J. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system. *Applied Energy*, 2016, vol. 167, pp. 377–384.
3. Govinda R., Timilsina B., Kalim U.S. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States. *Energy Policy*, 2016, vol. 98, pp. 653–662.
4. Mollik S., Rashid M.M., Hasanuzzaman M., et al. Prospects, progress, policies, and effects of rural electrification in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 65, pp. 553–567.
5. Afsharzade N., Papzan A., Ashjaee M., et al. Renewable energy development in rural areas of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 65, pp. 743–755.
6. Karamov D. N., Minarchenko I. M., Kolosnitsyn A. V., Pavlov N. V. Installed capacity optimization of autonomous photovoltaic systems under energy service contracting. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 240, 114256
7. Bilal B.O., Sambou V., Kebe C.M.F., et al. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO² Emissions. *Energy Procedia*, 2014, vol. 195, pp. 1636–1647.
8. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, pp. 4470–4482.
9. Karamov D.N., Suslov K.V. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, Suppl. 1 pp. 349–358.
10. Bernal-Agustín J. L., Dufo-Lopez R., Rivas-Ascaso D. M. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. *Renewable Energy*, 2006, vol. 31, pp. 2227–2244.

11. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R., et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, pp. 1409–1425.
12. Karamov D.N. Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 113–130.
13. Bernal-Agustin J. L, Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, pp. 2111–2118.
14. Green HJ, Manwell J. HYBRID2 – A Versatile Model of the Performance of Hybrid Power Systems In: *Proceedings of WindPower'95*, 1995, Washington DC.
15. Schiffer J., Sauer D. U., Bindner H., et al. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems. *Journal of Power Sources*, 2007, vol. 168, pp. 66–78.
16. Dufo-López R., Lujano-Rojas J. M., Bernal-Agustín J. L. Comparison of different lead–acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems. *Applied Energy*, 2014, vol. 115, pp. 242–253.
17. Karamov D.N. Formation of initial meteorological arrays with the use of long-term series FM 12 Synop and METAR in systems energy studies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 69–88.
18. Karamov D.N. Mathematical modeling of solar irradiance based on open access long-term meteorological observation data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28–37.

Dmitriy N. Karamov, AuthorID: 905773, SPIN-код: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru

Ildar R. Muftahov, AuthorID: 738846, SPIN-код: 2655-9802, ORCID: 0000-0003-2516-459X, ildar_sm@mail.ru

Vasilij V. Potapov, AuthorID: 740448, SPIN-код 1011-4444, ORCID: 0000-0002-3150-088X, PV1511@mail.ru

Anton A. Syromyatnikov, ORCID: 0000-0002-9720-6456, acad1killer@rambler.ru

Ilya N. Shushpanov, AuthorID: 678997, SPIN-код: 5280-0644, ORCID: 0000-0001-7121-7651, ilis83@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.05.2022; одобрена после рецензирования 10.06.2022; принята к публикации 14.06.2022.

The article was submitted 05/26/2022; approved after reviewing 06/10/2022; accepted for publication 06/14/2022.