

Разработка фотоэлектрических светосигнальных устройств для Московского региона

А.Б. ТАРАСЕНКО, О.С. ПОПЕЛЬ

Объединённый институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва
E-mail: a.b.tarasenko@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена расчётно-аналитическому и экспериментальному исследованию по освещению дорог, улиц, дорожных знаков, дворовых и парковых территорий путём использования солнечного излучения вкуче с электрохимическими аккумуляторами и энергосберегающими светильниками со светодиодами. В ряде случаев это снижает расходы на создание систем освещения – за счёт отказа от прокладки воздушных или подземных линий электропитания и решает энергетические проблемы в тех местах, где подключение к централизованной сети затруднено из-за её отсутствия или перегрузки существующими потребителями. Для условий Московского столичного региона выполнены расчёты технико-экономических показателей автономного светосигнального устройства (на основе дорожного знака с освещением) и проведена опытная эксплуатация двух экспериментальных вариантов такого устройства – с литий-ионными и свинцово-кислотными аккумуляторами. Разработан также контроллер заряда для оптимального управления солнечной батареей при использовании литий-ионного аккумулятора, что позволяет полнее использовать особенности последнего. Показано, что создание энергоустановок с возобновляемыми источниками энергии для нужд освещения в условиях круглогодичной работы осветительного или светосигнального устройства в режиме 24 ч в сутки требует существенных капитальных затрат, снижающихся при наличии периодов, в течение которых допускается отключение устройства. Применение литий-ионных аккумуляторов вместо свинцово-кислотных позволяет снизить затраты на создание и обслуживание установки – за счёт их лучших

ресурсных показателей и большей допустимой глубины разряда.

Ключевые слова: автономное освещение, светильник со светодиодами, солнечная батарея, литий-ионный аккумулятор, свинцово-кислотный аккумулятор, дорожные знаки.

Устройства солнечной энергетики всё шире используются во многих сферах экономики [1], в том числе для решения задач автономного электропитания разных устройств-потребителей. Современным трендом является использование фотоэнергетических установок в муниципальном хозяйстве для освещения участков дорог, парковых зон и дворовых территорий, а также в качестве дорожных светосигнальных устройств. В связи с суточной и сезонной нестабильностью поступления солнечного излучения, необходимостью обеспечения работы светосигнальных устройств в ночное время, а также в периоды снижения продолжительности солнечного сияния в зимнее время фотоэлектрические установки требуют оснащения их накопителями электрической энергии, что существенно влияет на их стоимость и эксплуатационные характеристики.

Большой интерес к использованию автономных фотоэлектрических устройств (АФУ) проявляется во многих российских регионах, в частности в Москве, где установлены уже тысячи разнотипных дорожных светосигнальных систем на пешеходных переходах (рис. 1). Типичное АФУ содержит фотоэлектрический модуль (ФЭМ), контроллер заряда, свинцово-кислотный аккумулятор (СКА) и светильник со светодиодами [2]. Солнечная энергоустановка в дневное время суток питает светильник (потребитель) и обеспечивает заряд аккумулятора, а ночью и в пасмурную погоду питание потребителя осуществляется только за счёт накопителя. Для

удешевления устройства в системе автоматического управления обычно используется контроллер с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) без контроля точки максимальной мощности (MPPT). В ряде случаев АФУ дополняется малой ветроустановкой. Масштабное производство АФУ организовано прежде всего в КНР, являющейся мировым лидером по промышленному производству и экспорту фотоэлектрических преобразователей.

Следует отметить, что подавляющее большинство зарубежных образцов ориентировано на использование в южных регионах, и попытки непосредственного их применения в средне- и высокоширотных российских регионах, в том числе в Москве, в большинстве случаев оказываются неудачными. Так, практически все первые установленные в Москве АФУ предупреждения водителей на пешеходных переходах оказались неработоспособными в холодный период. Они, как правило, оснащались ФЭМ малой мощности, который монтировался с углом наклона к горизонту, равным географической широте или даже меньшим, что приводило в зимнее время к их покрытию снегом, а в качестве накопителя энергии в них применялись свинцовые аккумуляторы, малоработоспособные при отрицательных температурах окружающей среды.



Рис. 1. Светосигнальное устройство

Характеристики некоторых литий-ионных аккумуляторов [6]

	$LiCoO_2 LiC_6$	$LiFePO_4 LiC_6$	$LiMn_2O_4 LiC_6$	$LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2 Li_4Ti_5O_{12}$
Удельная энергоёмкость, Вт·ч/кг	180	70–150	120–150	70–90
Цена, \$/Вт·ч	≥ 3	0,7–1,2	≥ 1	≥ 3
Рекомендуемая глубина разряда, %	60	70	80	90
Ресурс, циклов	800	3000–5000	1500	≥ 6000
Напряжение на аккумуляторе, В	4,2	3,3	3,7	2,1

Массовое прекращение работы этих систем в холодный период года привело к появлению усовершенствованных модификаций источников электропитания. Монокристаллический кремниевый ФЭМ во многих случаях был заменён на поликристаллический большей площади, и был резко увеличен угол наклона ФЭМ – до оптимального зимнего значения. При этом аккумулятор, размещённый внутри самого дорожного знака, как правило, из-за экономии затрат оставался чрезмерно мал.

Наиболее распространённым решением по аккумулярованию электроэнергии в системах с возобновляемыми источниками энергии на сегодняшний день являются СКА, и существенно реже применяются никель-кадмиевые батареи [3]. В последние годы в усовершенствовании СКА достигнут значительный прогресс. Рядом компаний разработаны специальные аккумуляторы для применений в источниках бесперебойного питания с гелевым электролитом, инкапсулированным в полимерной матрице, и пластинчатыми или тубулярными электродами. Эти меры во многом направлены на преодоление основных недостатков, присущих СКА: низкой допустимой глубины разряда, достаточно малого количества циклов «заряд-разряд» и снижения энергоёмкости при пониженных температурах. Важно иметь в виду, что стоимость свинцовых аккумуляторов обычно тем выше, чем лучше их ресурсные и другие эксплуатационные показатели [4].

Большинство литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) не имеют проблем с ресурсом и глубиной разряда, присущих СКА. Кроме того, они обладают существенно более высокими удельными энергетическими характери-

стиками, но дороже в расчёте на единицу накапливаемой энергии. Дополнительное удорожание устройств на основе ЛИА связано с тем, что по соображениям безопасности в батареях ЛИА должны использоваться специальные системы контроля и балансировки [5]. Отдельной проблемой служит учёт изменений эксплуатационных характеристик разных типов аккумуляторов при низких температурах окружающей среды. Некоторые типы ЛИА в этом отношении превосходят СКА, что особенно важно для малых автономных энергосистем, питающих дорожные знаки, бакены и осветительные устройства, в которых накопитель энергии термостатировать сложно.

И СКА, и ЛИА имеют несколько разновидностей. Существенное влияние на свойства аккумулятора оказывают применяемые катодные и, в меньшей степени, анодные материалы. В качестве первых широко используются литированные оксиды марганца, никеля/кобальта/алюминия (сложные оксиды), кобальта, а также литированный фосфат железа. Основным анодным материалом остаётся литированный углерод, но ряд компаний предлагает аккумуляторы на основе нанотитаната лития, отличающиеся выдающимися ресурсными показателями, но высокой стоимостью. Некоторые свойства различных литий-ионных электрохимических систем представлены в табл. 1.

В рамках работ по созданию эффективных автономных светосигнальных устройств на основе ФЭМ нами были проведены расчётные исследования в обоснование оптимального состава таких устройств. В качестве исходных климатических и актинометрических данных использовалась спутниковая климатологическая база данных

NASA-SSE [7–9]. Погрешность месячных сумм солнечного излучения, приведённых в ней, оценивается на уровне 10–15 % [8]. Вопросы построения инженерных методов расчёта оптимального состава автономного светосигнального устройства на основе анализа его энергетического баланса с использованием среднемесячных спутниковых данных затронуты в [10].

Рассматривались два варианта накопителей. Один содержал традиционные СКА по технологии «AGM» и относительно дешёвый контроллер заряда *EPSolar Tracer MPPT 1210*, допускающий работу потребителя как в течение всей ночи, так и в выбранные отрезки времени, а также реализующий алгоритм контроля точки максимальной мощности, что позволяет увеличить выработку энергии в пасмурную погоду, в утренние и вечерние часы [11]. А второй вариант – железфосфатные аккумуляторы компании *Winston Battery* [12], как наиболее дешёвые из доступных ЛИА и обладающие, к тому же, достаточно широким диапазоном рабочих температур. В обоих случаях использовались мульткристаллические ФЭМ типа ТСМ 140А компании «Телеком-СТВ» (г. Зеленоград). Потребителем электроэнергии являлись стандартные дорожные знаки «Пешеходный переход» с освещением светодиодами, работающие в круглосуточном режиме. Средняя потребляемая ими электрическая мощность составляла 4 Вт.

Выполненное оптимизационное (по критерию «минимизация стоимости устройств») математическое моделирование показало, что близкую к 100 % гарантированность электропитания светосигнального устройства в условиях Москвы могут обеспечить составы энергоустановок, при-

Параметры элементов выбранных конфигураций автономного светосигнального устройства

Тип аккумулятора	ФЭМ		АКБ					
	Площадь, м ²	КПД, %	Эффективная энергоемкость*, кВт·ч	Номинальная энергоемкость, кВт·ч	КПД, %	Минимальное время заряда**, ч	Минимальное время разряда**, ч	Допустимая глубина разряда, %
<i>Pb-Acid</i> («AGM»)	0,98	14,3	6,41	21	83	42,8	35,6	30
<i>LiFePO₄</i>				9	84	42,4		70

* С учётом допустимой глубины разряда

** По допустимой мощности контроллера в 180 Вт

ведённые в табл. 2. При этом степень гарантированности определялась как отношение обеспечиваемой энергоустановкой продолжительности работы светодиодного источника света к продолжительности года в часах. Для выбранных конфигураций степень гарантированности по результатам моделирования составила 97–98 % (работа осветительного устройства не менее 8500 ч в году), причём наиболее длительные (до нескольких суток) отключения питания устройства-потребителя в климатических условиях Москвы пришлось на январь.

С целью проверки эффективности работы автономных светосигнальных устройств по табл. 2 в ОИВТ РАН были созданы их экспериментальные образцы (рис. 2) с накопителями энергии на основе ЛИА и СКА (рис. 3) и проведена опытная эксплуатация с марта до декабря 2016 г. Система сбора данных, построенная на основе модулей ввода компании «Овен», измеряла токи и напряжения в цепях солнечной батареи, аккумуляторной батареи и нагрузки с частотой опроса 0,2 Гц. На основе полученных экспериментальных данных рассчитывались значения выработанной, накопленной различными типами аккумуляторов и переданной потребителю энергии (рис. 4). По периодам нулевого напряжения в цепи нагрузки определялись периоды, когда устройство не работало по причине низкого уровня заряда аккумуляторной батареи.

За время наблюдений (конец марта – начало декабря 2016 г.) степень гарантированности электропитания составила для СКА 89 %, а для литий-железофосфатных аккумуляторов – 87 %. Более высокая степень га-



Рис. 2. Экспериментальные образцы автономных светосигнальных устройств



Рис. 3. Блоки накопителей со свинцово-кислотными (а) и литий-ионными (б) аккумуляторами

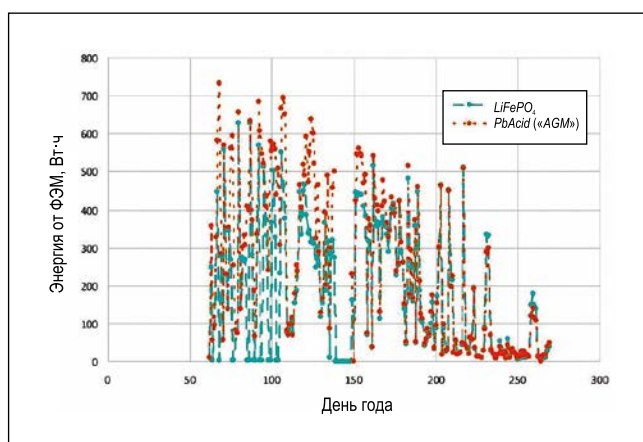


Рис. 4. Результаты измерений выработанной фотоэлектрическими модулями электрической энергии в устройствах с различными типами аккумуляторов в марте-декабре 2016 г.

Капитальные затраты для базовых вариантов устройства

Тип аккумуляторов	Капитальные затраты		
	Компоненты	Стоимость, руб.	Доля, %
Вариант А. Свинцово-кислотные («AGM»)	ФЭМ	7600	6,3
	Опорная конструкция	2800	2,3
	Контроллер	4500	3,7
	АКБ	72000	60
	Кабель, шкаф электротехнический	13000	10,7
	Строительно-монтажные работы	20000	17
ИТОГО по варианту А	Полная стоимость	120000	100
Вариант Б. Литий-ионные (на основе литированного фосфата железа)	ФЭМ	7600	8
	Опорная конструкция	2800	5
	Контроллер	7300	10,2
	АКБ	55400	49
	Кабель, шкаф электротехнический	12000	10,8
	Строительно-монтажные работы	19000	17
ИТОГО по варианту Б	Полная стоимость	112500	100

Таблица 4

Массогабаритные параметры накопительного блока для базовых вариантов устройства

Тип аккумуляторов	Масса, кг	Объём, м ³	Эффективная энергоёмкость, Вт·ч	Номинальная энергоёмкость, Вт·ч
Свинцово-кислотные («AGM»)	855	0,8	6410	21367
Литий-ионные (на основе литированного фосфата железа)	153	0,12	6410	9157

рантированности для СКА, как было установлено, объясняется более глубоким (больше рекомендуемого) разрядом аккумуляторов коммерческим контроллером заряда, что должно вести к сокращению срока службы по сравнению со сроком, гарантированным изготовителем. Разработанный экстремальный регулятор для литий-ионной батареи адаптирован к разрядной кривой аккумуляторов, установленных в данной батарее, что позволяло не допускать чрезмерного разряда.

Отклонение экспериментальных результатов по гарантированности работы устройств от расчётных может быть объяснено затенением ФЭУ соседними зданиями в вечерние часы и зимний период, имевшим место в реальном эксперименте.

Соотношение затрат на разные компоненты рассмотренных вариантов устройств приведено в табл. 3, а результаты оценки массогабаритных характеристик накопителей энергии – в табл. 4.

Учитывая, что один из существенных недостатков СКА – малый срок службы, можно оценить затраты на замены аккумуляторов в течение, например, 20 лет, соответствующих сроку службы ФЭМ по данным большинства производителей. При этом предполагается, что стоимость заменяемых аккумуляторов возрастает на 20 % за счёт затрат на их доставку и собственно замену. Так как оценка ресурса аккумулятора при переменной глубине циклов «заряд-разряд» без проведения длительных и дорогостоящих

экспериментов затруднена, то рассматривался пессимистичный сценарий – за год происходит 365 разрядов до допустимой глубины. Оценка затрат, связанных с заменой аккумуляторов за 20 лет эксплуатации, приведена в табл. 5. Видно, что применение ЛИА (на основе литированного фосфата железа) при приблизительно одинаковой начальной полной стоимости устройств с учётом требуемых замен аккумуляторов за длительный период эксплуатации становится более выгодным.

Выводы

1. Достижение высоких степеней гарантированности работы автономных осветительных и светосигналь-

Оценка влияния эксплуатационных затрат для разных типов аккумуляторов, применяемых в составе устройства

Тип аккумуляторов	Начальная стоимость устройства, тыс. руб.	Количество замен аккумуляторов за 20 лет	Стоимость устройства с учётом замен аккумуляторов, тыс. руб.
Свинцово-кислотные («АГМ»)	120	6	504
Литий-ионные (на основе литированного фосфата железа)	112,5	2	230

ных систем в условиях российских регионов требует детального учёта климатических и географических факторов при выборе состава энергоустановки. Обеспечение высокой степени гарантированности в регионах средних широт (например, в Москве) требует значительного повышения ёмкости накопителя энергии и установленной мощности ФЭМ, что приводит к существенному росту стоимости устройства. При этом, как показали исследования, повышение степени гарантированности сверх 95 % ведёт к необходимости резкого повышения ёмкости накопителя энергии и, соответственно, кратному увеличению стоимости устройства. Поэтому, с учётом данного обстоятельства, заказчики автономных светосигнальных устройств должны формулировать обоснованные реальными обстоятельствами требования к продолжительности гарантированной работы этих устройств, особенно в наиболее сложные зимние месяцы, например, допуская в техническом задании возможность выключения устройств в периоды времени, когда их работа не является критически важной.

2. Применение ЛИА позволяет в ряде случаев давать снижение капитальных и эксплуатационных затрат по сравнению с СКА и делать устройство накопителя энергии в несколько раз компактней. При этом оптимальным вариантом видятся аккумуляторы с катодом на основе литированного фосфата железа и анодом из литированного углерода.

3. Для интеграции ЛИА важно решить задачи построения надёжной системы управления батареями аккумуляторов и солнечной батареей, обеспечивающей заряд и разряд аккумуляторной батареи в оптимальных с точки зрения эффективности и ресурсных показателей режимах по напряжению, току и глубине разряда, а также контроль максимальной мощности солнечной батареи.

Исследование выполнено в рамках Научной школы РФ НШ-8406.2016.8 «Разработка научных основ новых технологий распределённой и возобновляемой энергетики» при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-50-00124).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попель О.С., Фортвов В.Е. Возобновляемая энергетика в современном мире. Учебное пособие – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 450 с. ISBN978-5-383-00959-8.
2. Solar street lights. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_street_light (дата обращения: 10.10.2017).
3. Тарасенко А.Б. Накопители электрической энергии для систем на основе ВИЭ: современное состояние и перспективы развития / Материалы VIII Всероссийской научной молодёжной школы с международным участием. – М.: Университетская книга, 2012. – С. 148–185.
4. Baker J. New technology and possible advances in energy storage // Energy Policy. – 2008. – Vol. 36. – P. 4368–4373.
5. Рыкованов А. Системы баланса литий-ионных батарей // Силовая электроника. – 2009. – № 1. – С. 52–55.
6. Scrosati B., Garche J. Lithium batteries: Status, prospects and future // Journal of Power Sources. – 2010. – Vol. 195. – P. 2419–2430.
7. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse> (дата обращения: 10.10.2017).
8. Попель О.С., Фрид С.Е., Киселёва С.В., Коломиец Ю.Г., Лисицкая Н.В. Климатические данные для возобновляемой энергетики (база климатических данных). Учебное пособие. – М.: ОИВТ РАН, 2010. – 56 с.
9. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселёва С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. – М.: ОИВТ РАН, 2010. – 84 с.
10. Komarova N.A., Rafikova Yu.Y., Tarasenko A.B., Kiseleva S.V. Autonomous power supply using solar energy in Russian Far East regions // MATEC Web of Conferences. – 2017. – No. 112. – P. 10011(1)–10011(6).
11. Шняников Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Теуцаков О.А., Осипов А.В., Аржанов К.В. Автономная фотоэлектри-

ческая энергетическая установка // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 4. – С. 133–138.

12. Web-сайт компании Winston Battery Ltd. URL: http://www.thunder-sky.com/products_en.asp?fid=111&fid2=115 (дата обращения: 10.10.2017).



Тарасенко Алексей Борисович, инженер-физик. Выпускник МИФИ. Старший научный сотрудник ОИВТ РАН и ведущий специалист ООО «ТЭ-ЭМП» группы компаний «Ренова». Лауре-

ат премии и медали им. академика В.М. Тучкевича за работу «Аморфный кремний: гетероструктурные солнечные элементы и электростанции» (совместно с учёными ФТИ им. А.Ф. Иоффе). Область научных интересов – фотоэнергетика, накопители электрической энергии, функциональные наноматериалы для накопителей, прогнозирование работы фотоэлектрических энергоустановок автономного и сетевого применения



Попель Олег Сергеевич, доктор техн. наук, профессор. Выпускник МЭИ. Заместитель директора ОИВТ РАН по науке и руководитель Научно-исследовательского центра

ОИВТ РАН «Физико-технические проблемы энергетики». Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники за работу «Разработка и внедрение эффективных технологий использования возобновляемых и нетрадиционных источников энергии в малой энергетике» (2011 г.). Область научных интересов – энергетика, возобновляемые источники энергии, энергосбережение, теплофизика