

КЛИМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВЕТОСИГНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ

О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиец, А.Б. Тарасенко

ФГБУН Объединенный институт высоких температур
Федерального агентства по научным организациям
РФ 125412, Москва, ул. Ижорская, д.13, строение 2
тел.: +7 495 484 23 74; e-mail: a.b.tarasenko@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2015.10-11.010

Заключение совета рецензентов: 06.05.15 Заключение совета экспертов: 20.05.15 Принято к публикации: 03.06.15

Бурное развитие и внедрение фотоэлектрических и ветроэнергетических автономных энергоустановок требуют комплексного анализа таких систем с учетом климатических условий региона применения и температурных режимов их эксплуатации. Проблема становится особенно актуальной ввиду существенных различий климатических условий регионов РФ. Тот факт, что температурные режимы не учитываются при проектировании энергоустановок, в ряде случаев приводит к потере работоспособности установок и снижению показателя гарантированности энергопитания потребителя. Наиболее чувствительны к температурным режимам используемые в установках накопители энергии. В статье представлен краткий анализ проблемы влияния высоких и низких температур окружающей среды на работоспособность автономных фотоэлектрических светосигнальных устройств и устройств наружного освещения, находящих все более широкое применение в различных регионах России.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, накопители электрической энергии, климатические условия, автономное освещение.

CLIMATIC ISSUES FOR RENEWABLE AUTONOMOUS PV LIGHT AND SIGNAL UNITS DEVELOPMENT

Oleg S. Popel, Semen E. Frid, Yulia G. Kolomiets, Alexey B. Tarasenko

Joint Institute for High Temperatures
(Russian Federation Agency for Scientific Institutions)
2 build., 13 Izhorskaya Str., 125412 Russian Federation
ph: +7 495 484 23 74; e-mail: a.b.tarasenko@gmail.com

Referred 6 May 2015 Received in revised form 20 May 2015 Accepted 3 June 2015

The paper shows that the fast growth and implementation of renewable energy systems require complex analysis for such systems composition and components taking into account the climatic region conditions of application. The problem is particularly urgent because of the significant differences of climatic conditions in the Russian Federation regions. The fact that operating temperature regimes are not taken into consideration in the design of power plants, in some cases leads to efficiency loss of power plants and reduce warranty of consumer power supply. The energy storage devices used in power plants are the most sensitive to temperature regimes.

This paper analyses the high and low operation temperature influence on different electric energy storage devices parameters of autonomous PV light and signal units as renewable energy systems containing energy storage devices.



Such power plants usually don't have resources for additional accumulator heating/cooling, therefore the correct choice of storage device is quite crucial in this case.

Keywords: renewable energy, electric energy storage, climatic conditions, autonomous lighting units.



Попель Олег Сергеевич
Oleg S. Popel

Сведения об авторе: д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе, ФГБУН Объединенный институт высоких температур Федерального агентства по научным организациям.

Образование: МЭИ.

Область научных интересов: процессы тепло- и массообмена, возобновляемые источники энергии, комплексное исследование энергосистем.

Публикации: 93.

Information about the author: DSc (engineering), Deputy Director of Joint Institute for High Temperatures.

Education: MPEI.

Research area: heat and mass exchange, renewable energy, complex investigation of energy systems.

Publications: 93.



Фрид Семен Ефимович
Semen E. Frid

Сведения об авторе: канд. техн. наук, заведующий лабораторией, ФГБУН Объединенный институт высоких температур Федерального агентства по научным организациям.

Образование: МЭИ.

Область научных интересов: процессы тепло- и массообмена, возобновляемые источники энергии, оценка ресурсного потенциала возобновляемой энергетики, математическое моделирование.

Публикации: 45.

Information about the author: PhD (engineering), Head of Laboratory, Joint Institute for High Temperatures.

Education: MPEI.

Research area: heat and mass exchange, renewable energy, renewable energy potential estimation, numerical simulation.

Publications: 45.



Коломиец Юлия Георгиевна
Yulia G. Kolomiets

Сведения об авторе: канд. техн. наук, научный сотрудник, ФГБУН Объединенный институт высоких температур Федерального агентства по научным организациям.

Образование: МЭИ.

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, гидроэнергетика, оценка ресурсного потенциала возобновляемой энергетики.

Публикации: 14.

Information about the author: PhD (engineering), researcher of Joint Institute for High Temperatures.

Education: MPEI.

Research area: renewable energy, renewable energy potential estimation, hydropower.

Publications: 14.



Тарасенко Алексей Борисович
Alexey B. Tarasenko

Сведения об авторе: инженер ФГБУН Объединенный институт высоких температур Федерального агентства по научным организациям.

Образование: МИФИ.

Область научных интересов: накопители электрической энергии, функциональные наноматериалы, возобновляемые источники энергии.

Публикации: 28.

Information about the author: engineer of Joint Institute for High Temperatures.

Education: MEPhI.

Research area: energy storage, functional nanostructured materials, renewable energy.

Publications: 28.



Введение

В настоящее время в мире использование возобновляемых источников энергии для нужд автономного энергоснабжения активно развивается [1]. Наиболее широкое распространение получили автономные светосигнальные устройства и устройства наружного освещения [2]. Поиск новых эффективных технических решений автономного электропитания светосигнальных устройств, особенно расположенных на удалении от электрических сетей и пунктов возможного электрического подключения, привлекает все большее внимание разработчиков, потребителей и энергосервисных компаний. Применение автономных систем электропитания таких устройств актуально и с точки зрения повышения надежности в случае аварий в электросетях.

Фотоэлектрические преобразователи, работающие совместно с электрохимическими аккумуляторами, сегодня можно встретить на улицах и на автомобильных магистралях многих зарубежных и ряда российских городов. Растет число фирм, продвигающих различные модификации таких установок и на российский рынок. Большой интерес в этой сфере проявляется во многих российских регионах, в частности в Москве, где установлены уже сотни различных видов дорожных светосигнальных устройств на пешеходных переходах [3].

Типовое решение включает в себя фотоэлектрический модуль, контроллер заряда, свинцово-кислотный аккумулятор с гелевым электролитом и светодиодный светильник [2]. Для максимального удешевления обычно используется контроллер с широтно-импульсной модуляцией, без контроля точки максимальной мощности (рисунок 1).

В ряде случаев система дополняется ветроустановкой. Особенно широко такие системы применяются в Китае и Германии. Системы китайского производства активно экспортируются за рубеж. По компоновочному исполнению такие системы можно разделить на блочные, в которые встроены и фотоэлектрический модуль, и аккумулятор, и контроллер, и светильник, – и на отдельные, монтируемые на обычные столбы с отдельной установкой фотоэлектрических модулей (ФЭМ) и блока аккумулятирования и преобразования электрической энергии, также размещаемого в подвешенном на столбе герметичном монтажном шкафу. Угол наклона ФЭМ к горизонту задается опорной конструкцией.

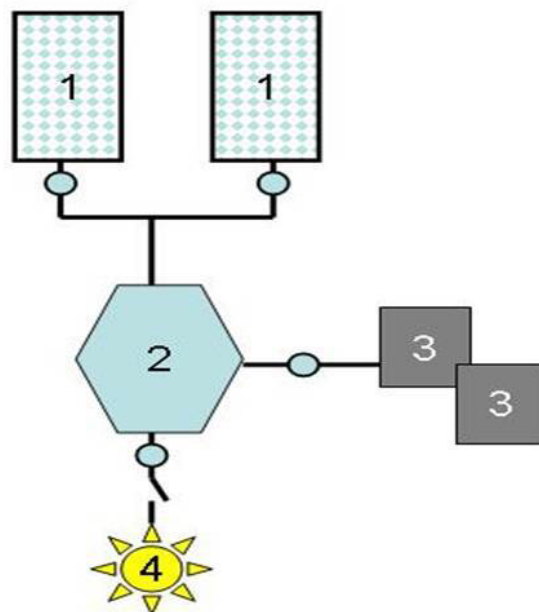


Рис. 1. Схема типовой энергоустановки:

1 – фотоэлектрические модули, 2 – контроллер, 3 – аккумуляторные батареи, 4 – светосигнальное устройство

Fig. 1. Layout of typical autonomous PV light/signal system:
1 – PV modules, 2 – charge controllers, 3 – energy storage device, 4 – light and signal device

Следует отметить, что подавляющее большинство зарубежных образцов ориентировано на использование в южных районах, и попытки их применения в средних и высоких широтах российских регионов, в том числе в Москве, оказываются не всегда удачными. Так, практически все установленные в Москве автономные светосигнальные системы предупреждения водителей на нерегулируемых пешеходных переходах [4] в конце 2011 – начале 2012 года в зимнее время оказались неработоспособными. Вопросы оптимизации состава энергоустановки с точки зрения подбора оптимальной мощности модуля и емкости аккумуляторной батареи были достаточно подробно рассмотрены в работе [2]. В данной статье основное внимание уделяется проблеме применения в автономных энергоустановках накопителей электрической энергии, призванных обеспечивать энергией светосигнальное устройство в ночное время и в периоды длительного снижения мощности первичных источников энергии. Проблема заключается в том, что помимо неоптимального состава установки (батарея разряжается раньше, чем заканчивается темное время суток или бессолнечные дни), к прекращению работы устройства или его полному выходу из строя может привести воздействие температуры окружающей среды на накопитель электрической энергии.

Разновидности накопителей электрической энергии и их устойчивость к воздействию низких и высоких температур

Снижение температуры до $-20...-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к резкому росту сопротивления большинства аккумуляторов, что прежде всего ведет к снижению их способности воспринимать заряд [5]. Длительное нахождение свинцово-кислотных аккумуляторов при пониженной температуре в состоянии глубокого разряда ведет к необратимой потере энергоемкости в результате запуска паразитных электрохимических реакций на электродах, причем опасные глубины разряда начинаются с 40–50 %. Для литий-ионных аккумуляторов эта проблема не так актуальна вследствие того, что рабочая глубина разряда этих систем составляет 70–90 % [6].

С другой стороны, высокие температуры также отрицательно влияют на химические источники тока и приводят к их ускоренной деградации. В этой связи целесообразно рассмотреть те диапазоны температур, в которых аккумуляторы функционируют нормально, и те, где их эксплуатация либо затруднена, либо ведет к стремительной деградации электрохимической системы. Для анализа применимости различных типов источников тока целесообразно рассмотреть как особенности отдельных типов электрохимических источников тока, так и характерный для каждого региона страны годовой ход температур.

Для применения в энергоустановках на основе возобновляемых источников энергии обычно рассматриваются следующие электрохимические источники энергии.

Свинцово-кислотный аккумулятор (СКА) известен как наиболее отработанная и широко используемая система не только на электротранспорте, но и в энергетике вообще.

В настоящее время существует несколько разновидностей свинцово-кислотных аккумуляторов [7]. Они различаются химическими добавками к материалу положительных и отрицательных пластин, состоянием электролита и областями применения. Первыми были созданы заливные аккумуляторы со свободным электролитом, в которых положительный и отрицательный электроды погружены в водный раствор серной кислоты.

Позже на рынке появились аккумуляторы с иммобилизованным в полимерной матрице (Absorbed glass mate) и гелевым (Gel) электролитом. Такие аккумуляторы могут эксплуатироваться в любом положении относительно поверхности Земли и не требуют обслуживания, поэтому общий термин для данного типа систем – герметизированные аккумуляторы. Они снабжены рекомбинаторами водорода, превращающими выделившийся в процессе электролиза газ в воду и таким образом компенсирующими потери электролита при перезаряде [7].

Гелевые аккумуляторы оптимизированы для постоянных глубоких зарядов и разрядов, поэтому они

наиболее часто применяются в системах с ВИЭ. Рядом зарубежных компаний выпускаются специальные «солнечные» серии аккумуляторов номинальным напряжением 2, 6 и 12 В для солнечных энергоустановок («Sonenschein», «Delta», «Hoppesche», «Fiamm», «Rittar», «Prosolar», «Haze» и др.).

Близким к свинцово-кислотным аккумуляторам источником тока, нашедшим применение прежде всего на электрическом и гибридном транспорте, является гибридный двойнослойный суперконденсатор с сернокислотным электролитом [8]. Данный тип источника отличается от свинцово-кислотного аккумулятора заменой катодного электрода на углеродный пористый материал и переходом от электрохимических реакций при заряде/разряде накопителя к процессам формирования двойного электрического слоя на границе раздела электрода и электролита. Более подробно данные процессы описаны в [9].

Энергоемкость свинцово-кислотного аккумулятора существенно падает при понижении температуры. Так, при минус $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ свинцово-кислотный аккумулятор может выдать только 50 % энергоемкости и только при разряде малыми токами. Практически для всех типов свинцово-кислотных аккумуляторов при пониженных температурах заряд существенно затруднен. При минус $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ гелевые свинцово-кислотные аккумуляторы заряжаться не могут, заряжаются только AGM-аккумуляторы малыми токами [5].

Повышение температуры хранения увеличивает подвижность ионов, снижая внутреннее сопротивление, и ускоряет химические реакции на электродах. Побочным результатом этого является увеличение токов саморазряда аккумулятора. Влияние повышенных температур на токи саморазряда показано на рисунке 2.

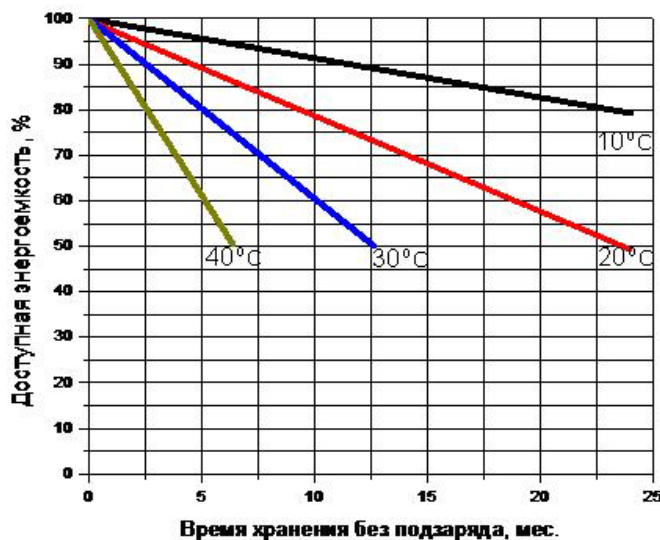


Рис. 2. Влияние температуры на токи саморазряда свинцово-кислотного аккумулятора с матричным электролитом

Fig. 2. Influence of temperature on self-discharge current for lead-acid AGM accumulator

Рассматривая суперконденсаторы со свинцовыми электродами и сернокислотным электролитом, можно отметить, что влияние на них пониженных температур в значительной степени нивелируется тремя факторами: иммобилизацией электролита в пористой матрице, что снижает вероятность его замерзания, малым количеством электролита в сепараторе и отсутствием процессов переноса заряда между электродами. Это позволяет сернокислотным суперконденсаторам надёжно функционировать при температурах до -20°C . Дальнейшее снижение температуры приводит к ухудшению характеристик в результате роста сопротивления электролита.

Появление **никель-кадмиевых аккумуляторов** позволило существенно (примерно в два раза) снизить массогабаритные характеристики накопителя и на порядок повысить токи заряда и разряда, обеспечиваемые щелочным электролитом с малым удельным сопротивлением. Следует отметить устойчивость данного типа аккумуляторов к низким температурам и глубокому разряду. Первое обстоятельство привело к массовому применению такого типа аккумуляторов в источниках питания собственных нужд железнодорожных вагонов и авиационной техники.

В зависимости от конструкции, режима работы (длительные или короткие разряды) и чистоты применяемых материалов, срок службы составляет от 100 до 9 000 циклов заряда/разряда. Современные (ламельные) промышленные никель-кадмиевые батареи могут служить до 20–25 лет. Никель-кадмиевые аккумуляторы (Ni-Cd) – единственный вид аккумуляторов, который может храниться разряженным. Для данного типа аккумуляторов также характерна устойчивая работа при пониженных (-20°C) температурах и малый нагрев при заряде и разряде высокими токами за счет применения щелочного электролита. Основным недостатком данного типа аккумуляторов является так называемый эффект памяти: если зарядке подвергается не полностью разряженный аккумулятор, его рабочее напряжение снижается из-за формирования дополнительного двойного электрического слоя на электродах, как бы запирающего остаточную емкость. Многократное повторение этого явления приводит к выходу аккумулятора из строя, поэтому аккумуляторы данного типа целесообразно применять в системах, для которых характерен глубокий разряд. В результате применения щелочного электролита рабочие температуры таких аккумуляторов существенно ниже, чем для СКА. Точка замерзания щелочного электролита на основе 31 % калиевой щелочи составляет -66°C ,

однако уже до этой точки наблюдается существенный рост внутреннего сопротивления, что ограничивает разрядные и зарядные токи аккумулятора до 0,2 С при минус 40°C [10].

Стремительное развитие **литий-ионных аккумуляторов (ЛИА)**, появление новых материалов катодных и анодных электродных структур привели к снижению стоимости и улучшению их характеристик. Из портативных применений ЛИА стали проникать сначала в электромобили, а затем и в стационарные системы [11]. В отличие от СКА и рассмотренных выше щелочных аккумуляторов, литий-ионные аккумуляторы подразделяются на несколько подклассов по применяемым катодным системам, которые различным образом реагируют на повышенные и пониженные температуры.

В целом, большинство систем, также как и аккумуляторы с водным электролитом, существенно снижают свои характеристики при температурах ниже -20°C .

Особняком в данном ряду стоят аккумуляторы с титанатным анодом, разработчики которых гарантируют работу и за пределами этого диапазона, что подтверждается проведенными независимыми испытаниями [12]. Существенным недостатком такого типа аккумуляторов является высокая стоимость и малые удельные характеристики, что обусловлено высоким анодным потенциалом титаната лития в органических электролитах. Так, удельная энергоёмкость аккумуляторов Altair Nano находится в диапазоне 70–90 Втч/кг, а удельная стоимость превышает 3 долл США за 1 Втч номинальной энергоёмкости. Для сравнения самые дешёвые китайские литий-ионные аккумуляторы имеют удельную стоимость 0,4–0,7 долл США/Втч при близких удельных характеристиках.

По заверениям разработчиков, аккумуляторы Thunder Sky работоспособны вплоть до -40°C , однако независимые испытания показывают, что даже при более высоких температурах аккумулятору требуется около 20 минут для выхода на номинальный режим. В течение этих 20 минут фактически идет разряд изделия на внутреннее сопротивление, сопровождающийся его разогревом. Следовательно, существенная часть энергоёмкости теряется в ходе этого процесса.

До банкротства компании A123 Systems – одного из самых известных производителей литий-железодифосфатных аккумуляторов, – в основном специализировавшейся на батареях для электротранспортных средств, по её заказу велись работы над новым катодным материалом, обеспечивающим повышение выдаваемой при -30°C мощности и емкости более чем на 20 %. Тестирование материала проводилось Авто-



мобильным центром Университета штата Огайо (США) [13]. При этом новый материал, названный Nanophosphate EXT, также обеспечивает высокую стабильность и при повышенных температурах.

Проточные редокс-батареи пока еще не нашли широкого применения, хотя ряд установок на основе возобновляемых источников энергии с этим типом накопителей уже функционируют [14]. Основное преимущество – возможность раздельного изменения мощности и энергоемкости накопителя, а также допустимая глубина разряда почти 100 %. Удельные характеристики системы находятся на уровне СКА. [15]. Однако эти батареи крайне чувствительны к температуре: при пониженных температурах начинается преципитация растворенных в электролите солей, при повышенных – паразитные реакции в самом растворе, фактически коагуляция [16], так как для поддержания приемлемых удельных характеристик приходится использовать концентрации солей, близкие к предельным [17]. Задача термостатирования проточной батареи крайне трудна из-за больших объемов баков с электролитами. Имеющиеся данные по системе собственных нужд ста-

ционарных накопителей на основе таких батарей позволяют предположить, что критичным для поддержания растворов солей ванадия является выход за диапазон температур от -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$ [14].

Топливные элементы. Несмотря на сложность и дороговизну, накопители на основе водородного цикла с твердополимерными топливными элементами [11] рассматриваются в некоторых работах в качестве источников электропитания автономных осветительных устройств [18]. Такие топливные элементы крайне чувствительны к пониженным температурам, поскольку на катоде постоянно находится некоторое количество воды, оставшееся с предыдущих запусков. Ее замерзание при длительном хранении установки при отрицательных температурах вызывает разрыв микропористого слоя катодного электрода и выход установки из строя [19].

Результаты анализа литературных данных по рабочим температурным диапазонам различных видов накопителей электрической энергии сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Сводные данные по предельным температурным режимам электрохимических источников тока

Table 1

Data on operational temperature range for different electric energy storage devices

№	Тип источника тока	Границы рабочего диапазона, $^{\circ}\text{C}$	Источник информации
1	Литий-ион	$-30...+50$	[13]
		$-25...+50$	[20]
		$-25...+50$	[12]
2	Никель-кадмий	-40 (при 0,2 С)... $+40$	[21]
		-40 (при 50 % энергоемкости)	[22]
3	Свинец-кислота	-20 (только разряд)... $+50$	[23]
4	Водородно-воздушный топливный элемент	$0...+60$	[19]
5	Проточные редокс-батареи	$-20...+40$	[24]

Температурные характеристики регионов России

Для обоснования рекомендаций по выбору оптимальных типов накопителей электрической энергии для автономных энергоустановок на ВИЭ

представляют интерес температурные характеристики регионов России. На рисунке 3 представлены карты повторяемости температур наружного воздуха на территории России, превышающих контрольные значения.

а



б

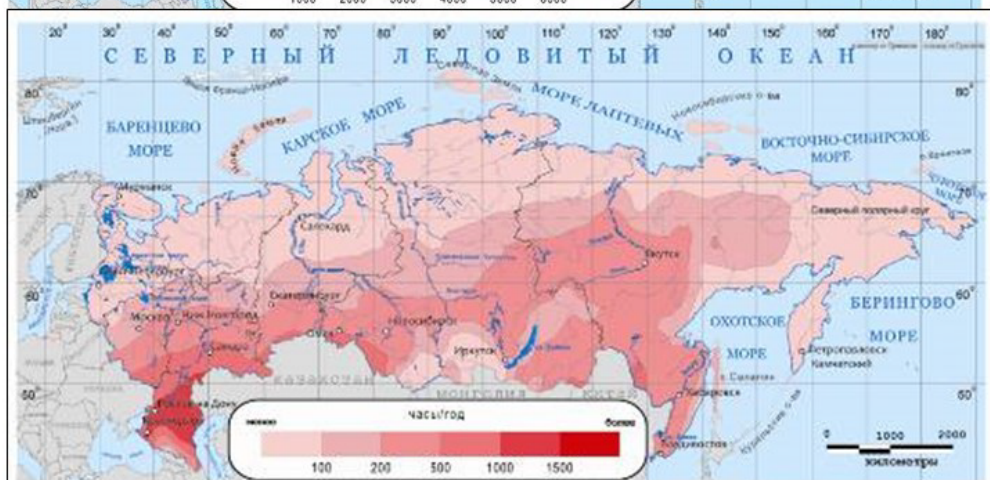


Рис. 3. Районирование регионов РФ по температурным режимам. Продолжительность периодов с температурой: а) ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, б) выше $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, час/год

Fig. 3. Average environmental temperature for different regions of Russian Federation (low and high temperatures). Period duration for average temperatures, hours per year: under $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, б) above $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Карты построены на основе климатических данных NASA и имеющихся данных измерений наземных метеостанций с использованием подходов, описанных в [22, 23]. Карты иллюстрируют тот факт, что температура воздуха ниже нуля наблюдается повсеместно на территории России весьма длительное время, а за Уралом продолжительность температур ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ превышает 1 000 часов в год. Значительные территории на востоке страны характеризуются температурами ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 2 000 часов в год. Длительные высокие температуры наружного воздуха выше $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ характерны только для южных регионов страны.

Выводы и рекомендации по выбору накопителей для автономных устройств

Изложенное выше позволяет сформулировать некоторые выводы и рекомендации применительно к использованию накопителей энергии в автономных светосигнальных, осветительных и других устройствах, работающих на ВИЭ. Рассматриваемые устрой-

ства, как правило, имеют небольшую мощность и размещаются на опорных конструкциях на открытом воздухе, причем применение специальных мер термостатирования устройств невозможно ни по техническим, ни по экономическим причинам.

В климатических условиях России наиболее губительным для аккумуляторов оказывается воздействие не столько высоких, сколько низких температур. На летнее время приходится высокие уровни солнечной радиации и относительно короткие ночи, что позволяет иметь аккумулятор в состоянии близком к полной зарядке и при необходимости затрачивать часть выработанной энергии на его охлаждение путем обдува вентилятором. В зимнее же время наряду с понижением температуры воздуха существенно падает поступление солнечной радиации и выработка энергии фотоэлектрическим модулем с одновременным ростом ее потребления, а это приводит к тому, что аккумулятор подвергается воздействию низкой температуры в сильно разряженном состоянии. Для свинцово-кислотных систем такая ситуация

чревата не разовым снижением гарантированности питания, а выходом из строя с полной заменой аккумулятора. Кроме того, следует подчеркнуть особенность гелевых свинцово-кислотных аккумуляторов – при отрицательных температурах их сопротивление возрастает настолько, что заряд даже малыми токами прекращается полностью. Это означает, что и в ясный морозный день такой аккумулятор заряжаться не будет.

Основной проблемой никель-кадмиевых аккумуляторов является их неустойчивость из-за эффекта памяти при циклах заряда/разряда с переменной глубиной, характерного для фотоэлектрических систем. Зимой глубина разряда увеличивается, а летом, наоборот, снижается, причем температурные зависимости не оказывают на это существенного влияния.

Среди литий-ионных систем только аккумуляторы с титанатным анодом могут обеспечить устойчивую работу рассматриваемых устройств без внешнего термостатирования до $-30...-35^{\circ}\text{C}$, но и они, скорее всего, окажутся бессильны при длительных воздействиях температур ниже -40°C . Кроме того, применение этого типа аккумуляторов ограничено высокой ценой.

Поэтому оптимальным выходом из сложившейся ситуации видится заглубление аккумуляторных батарей в герметичном контейнере в землю рядом с опорой энергоустановки на уровень, близкий к промерзанию грунта. В этом случае колебания температур оказываются не столь существенными, как при расположении аккумулятора на опоре. При этом в южных регионах возможно применение свинцово-кислотных аккумуляторов с гелевым электролитом, как наиболее дешевых и обладающих высокими ресурсными характеристиками, а в более высоких широтах – литий-ионных с железо-фосфатным электролитом, поскольку требуемая емкость аккумуляторной батареи растет с увеличением широты местности из-за более глубокого сезонного снижения поступления солнечной радиации. Следует отметить, что в результате большей удельной энергоемкости и допустимой глубины разряда у литий-ионных аккумуляторов их объем будет меньше, следовательно, удастся снизить и затраты на проведение земляных работ. Литий-ионные аккумуляторы с титанатным анодом могут найти применение в регионах с более суровым климатом.

Использование в малых системах накопителей на основе водородного цикла и проточных батарей представляется нецелесообразным, так как проблемы зависимости рабочих параметров и ресурса для них решаются сложнее, чем для рассмотренных ранее. Удельные характеристики накопителя на основе водородного цикла могут быть существенно увеличены за счет повышения давления водорода в баллонах, но это потребует существенных мер безопасности, что также ведёт к удорожанию установки. Кроме того, сдерживающим фактором служит высокая стоимость электролизера и топливного элемента.

Для ряда регионов с суровыми климатическими условиями проблема низких температур сочетается с

проблемой вечной мерзлоты, затрудняющей проведение земляных работ. В этом случае предлагается создавать локально-централизованные светосигнальные системы с питанием от единого блока солнечных батарей и накопителей, при этом накопители располагаются в теплоизолированном контейнере с термостатированием, а сама система может быть снабжена дизель-генератором для повышения степени гарантированности энергоснабжения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-06048).

Список литературы

1. Фортов В.Е., Попель О.С. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 1–10.
2. Попель О.С., Тарасенко А.Б., Фрид С.Е. Анализ эффективности использования автономных фотоэлектрических систем наружного освещения в климатических условиях Москвы и юга России // Теплоэнергетика. 2012. № 11. С. 19–25.
3. «Москва засветится по-новому» [Электронный ресурс] <http://www.mk.ru/social/article/2012/01/09/658831-moskva-zasvetitsya-ponovomu.html>
4. Светофоры на солнечных батареях ПК «Агро-мастер». [Электронный ресурс] <http://www.pk-agromaster.ru/fonari2/>; <http://lifenews.ru/news/75983>
5. Руководство по эксплуатации батарей Power Sonic. [Электронный ресурс] <http://www.batteryweb.com/manuals/techman.pdf>; POWER-SONIC CORPORATION 9163 Siempre Viva Road San Diego, CA 92173.
6. Попель О.С., Тарасенко А.Б. Современные виды электрохимических накопителей электрической энергии и их применение в автономной и централизованной энергетике // Теплоэнергетика. 2011. № 11. С. 2–11.
7. Интернет-сайт фирмы «Ваш солнечный дом». [Электронный ресурс] <http://www.solarhome.ru/ru/batteries/index.htm>
8. Volkovich Yu.M., Bagotzky V.S. The method of standard porosimetry 2. Investigation of the formation of the porous structures // Journal of Power Sources. 1994. Vol. 48. P. 327.
9. Pandolfo A.G., Hollenkamp A.F. Carbon properties and their role in supercapacitors // Journal of Power Sources. 2006. Vol. 157. P. 11–27.
10. David G. Vutetakis. The Avionics Handbook. Ch. 10. CRC Press LLC, 2001.
11. Попель О.С., Тарасенко А.Б. Накопители электрической энергии // Энергоэксперт. 2011. № 3. С. 26–35.
12. The AES Corporation Summary of AltairNano Validation Testing. June 27, 2008. [Электронный ресурс] http://www.b2i.cc/Document/546/KEMA_Report.pdf/
13. Пресс-релиз A123 Systems от 12 июня 2012 года [Электронный ресурс] <http://www.a123.com>

14. Martha Schreiber, Adam H. Whitehead, Martin Harrer. VANADIUM REDOX FLOW BATTERY IMPROVED TECHNOLOGY // ENVIETECH. 31.01.–01.02.2008 Wien

15. Maria Skyllas-Kazacos. An Historical Overview of the Vanadium Redox Flow Battery Development at the University of New South Wales, Australia [Электронный ресурс] <http://www.ceic.unsw.edu.au/centers/vrb/>

16. Rahman F., Skyllas-Kazacos M. Solubility of vanadyl sulfate in concentrated sulfuric acid solutions // Journal of Power Sources. 21 April 1998. Vol. 72, Issue 2. P. 105–110.

17. Vanadium Redox Flow Batteries: An In-Depth Analysis. EPRI, Palo Alto, CA: 2007.

18. Jeremy Lagorse, Damien Paire, Abdellatif Miraoui. Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell, PV and battery // Renewable Energy. 2009. No 34. P. 683–691.

19. Pinton E., Fourneron Y., Rosini S., Antoni L. Experimental and theoretical investigations on a proton exchange membrane fuel cell starting up at subzero temperatures // Journal of Power Sources. 2009. No 186. P. 80–88.

20. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России / О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиец и др. М.: ОИВТ РАН, 2010.

21. Фортов В., Попель О. Возобновляемые источники энергии для энергоснабжения потребителей в России // Энергетический вестник. 2010. № 1 (8). С. 9–29.

References

1. Fortov V.E., Popel O.S. Sostoânie razvitiâ vozobnovlâemykh istočnikov ènergii v mire i v Rossii. *Teploènergetika*, 2014, no. 6, pp. 1–10 (in Russ.).

2. Popel O.S., Tarasenko A.B., Frid S.E. Analiz èffektivnosti ispol'zovaniâ avtonomnykh fotoèlektričeskikh sistem naružnogo osvešeniâ v klimatičeskikh usloviâh Moskvy i ŭga Rossii. *Teploènergetika*, 2012, no. 11, pp. 19–25 (in Russ.).

3. «Moskva zasvetitsâ po-novomu» Available at: <http://www.mk.ru/social/article/2012/01/09/658831-moskva-zasvetitsya-ponovomu.html> (in Russ.).

4. Svetofory na solnečnyh batareâh PK «Agromaster». Available at: <http://www.pk-agromaster.ru/fonari2/>; <http://lifenews.ru/news/75983> (in Russ.).

5. Power Sonic battery manual. Available at: <http://www.batteryweb.com/manuals/techman.pdf>; POWER-SONIC CORPORATION 9163 Siempre Viva Road San Diego, CA 92173 (in Eng.).

6. Popel O.S., Tarasenko A.B. Sovremennye vidy èlektrohimičeskikh nakopitelej èlektričeskoj ènergii i ih

primenenie v avtonomnoj i centralizovannoj ènergetike. *Teploènergetika*, 2011, no. 11, pp. 2–11 (in Russ.).

7. Website «Vaš solnečnyj dom». Available at: <http://www.solarhome.ru/ru/batteries/index.htm> (in Russ.).

8. Volfkovich Yu.M., Bagotzky V.S. The method of standard porosimetry 2. Investigation of the formation of the porous structures *Journal of Power Sources*, 1994, vol. 48, pp. 327 (in Eng.).

9. Pandolfo A.G., Hollenkamp A.F. Carbon properties and their role in supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 2006, vol. 157, pp. 11–27 (in Eng.).

10. David G. Vutetakis. The Avionics Handbook, Ch. 10, CRC Press LLC, 2001 (in Eng.).

11. Popel O.S., Tarasenko A.B. Nakopiteli èlektričeskoj ènergii. *Ènergoèkspert*, 2011, no. 3, pp. 26–35 (in Russ.).

12. The AES Corporation Summary of AltairNano Validation Testing, June 27, 2008. Available at: http://www.b2i.cc/Document/546/KEMA_Report.pdf (in Eng.).

13. A123 Systems press-release from June, 12, 2012. Available at: <http://www.a123.com> (in Eng.).

14. Martha Schreiber, Adam H. Whitehead, Martin Harrer. VANADIUM REDOX FLOW BATTERY IMPROVED TECHNOLOGY. *ENVIETECH* 31.01.–01.02.2008, Wien (in Eng.).

15. Maria Skyllas-Kazacos. An Historical Overview of the Vanadium Redox Flow Battery Development at the University of New South Wales, Australia. Available at: <http://www.ceic.unsw.edu.au/centers/vrb/> (in Eng.).

16. Rahman F., Skyllas-Kazacos M. Vanadium Redox Battery: Positive Half-Cell Electrolyte Studies. *Journal of Power Sources*, 2008, vol. 72, issue 2, pp. 105–110 (in Eng.).

17. Vanadium Redox Flow Batteries: An In-Depth Analysis. EPRI, Palo Alto, CA, 2007 (in Eng.).

18. Jeremy Lagorse, Damien Paire, Abdellatif Miraoui. Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell, PV and battery. *Renewable Energy*, 2009, no. 34, pp. 683–691 (in Eng.).

19. Pinton E., Fourneron Y., Rosini S., Antoni L. Experimental and theoretical investigations on a proton exchange membrane fuel cell starting up at subzero temperatures. *Journal of Power Sources*, 2009, 186, pp. 80–88 (in Eng.).

20. Atlas resursov solnečnoj ènergii na territorii Rossii / O.S. Popel, S.E. Frid, Yu.G. Kolomiets et al. Moscow: OIVT RAN Publ., 2010 (in Russ.).

21. Fortov V., Popel O. Vozobnovlâemye istočniki ènergii dlâ ènergosnabženiâ potrebitelej v Rossii. *Ènergetičeskij vestnik*, 2010, no. 1 (8), pp. 9–29 (in Russ.).

Транслитерация по ISO 9:1995

