

# Компактный кинетический накопитель энергии



Блок накопления кинетической энергии, используемый в ЖКХ города Мюнхена, Германия

Около 13 % населения Земли, а это почти миллиард человек, не имеют доступа к электроэнергии. В основном это жители стран Африки, а также Центральной и Южной Азии. По некоторым экспертным оценкам, от 60 до 70 % территории России не охвачены централизованной электросетью. Однако важно отметить, что около 85 % территории России не заселено, а 60 % территории покрыто вечной мерзлотой. Большая часть территории Российской Федерации (¾ территории) — это Сибирь и Дальний Восток, где проживает около 13 % населения России, или около 20 млн человек [1]. Предполагается, что объём децентрализованного производства электроэнергии в России может составлять около 100 ГВт·ч в год, что составляет около 9 % от общего производства электроэнергии в России.

Причины отсутствия подключения в централизованной сети разные. Есть потребители, которые находятся в таких удалённых территориях, куда невозможно или экономически невыгодно вести централизованные сети. Это и удалённые СНТ, которые по ряду причин не могут подключиться к централизованной сети, и охотничьи домики, метеостанции, различные туристические объекты, базы отдыха и так далее. Не так давно един-

ственным решением для таких объектов было использование бензогенераторов, что является дорогим и неэкологичным решением. Современный уровень развития солнечной энергетики позволяет электрифицировать этих потребителей по новой технологии, которая на сегодня является достаточно сильным конкурентом централизованным сетям.

**Предполагается, что объём децентрализованного производства электрической энергии в России может составлять около 100 ГВт·ч в год, что составляет около 9 % от общего производства электроэнергии в Российской Федерации**

Если при использовании солнечных панелей совместно с централизованным электроснабжением срок окупаемости составляет на сегодня пять-семь лет, то автономные солнечные системы окупаются, как правило, в день установки. Необходимо отметить, что технологии солнечного электроснабжения прекрасно решают проблемы электроснабжения, но абсолютно не подходят для целей теплоснабжения.

Рецензия эксперта на статью получена 09.09.2019 [Expert review on the article received on September 9, 2019].

УДК 621.313.15. Научная специальность: 05.14.08.

## Компактный кинетический накопитель энергии

**М. Е. Павличенко**, инженер путей сообщения (электромеханик), директор ООО «ДДК»; **Ю. О. Малоземова**, магистр экономики, генеральный директор ООО «Лодела»

В статье рассматриваются вопросы выбора оптимального накопителя энергии для автономных солнечных электростанций (АСЭС). Рассмотрены достоинства и недостатки различных накопителей электрической энергии, применяемых в АСЭС. Обосновано применение компактного кинетического накопителя энергии для совместной работы с химическим аккумулятором. Определены технические параметры устройства. Сформулированы параметры компактного кинетического накопителя электрической энергии для широкого круга потребителей: масса — до 25 кг, номинальное напряжение — 12 В постоянного тока, плотность энергии — выше 10 Вт·ч/кг, рабочий диапазон температур от -40 до +70 °С, срок службы — 20 лет. Ожидаемый эффект — увеличение срока службы свинцово-кислотных аккумуляторов в два раза.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, накопитель энергии, маховик.

UDC 621.313.15. The number of scientific specialty: 05.14.08.

## Compact kinetic energy storage

**M. E. Pavlichenko**, railway engineer (electrical officer), director of "DDK", LLC; **Yu. O. Malozemova**, Master of Economics, general director of "Lodela", LLC

The article discusses the choice of the optimal energy storage for autonomous solar power plants (ASPP). The advantages and disadvantages of various electric energy storage devices used in the ASPP are considered. The use of a compact kinetic energy storage device for collaboration with a chemical battery is justified. The technical parameters of the device are determined. The parameters of a compact kinetic electric energy storage device are formulated for a wide range of consumers: weight — up to 25 kg, nominal voltage — 12 V DC, energy density — above 10 Wh/kg, operating temperature range -40...+70 °C, entire lifetime — 20 years. The expected effect is a double increase in the lifetime of lead-acid batteries.

**Keywords:** solar power, energy storage, flywheel.

Если сравнивать с атомной генерацией, то установленный 1 Вт АЭС обходится в \$6–7, а 1 Вт солнечных панелей можно найти по цене \$0,19 (FOB). Атомную энергию необходимо преобразовать в ток высокого переменного напряжения, передать на дальние расстояния, затем понизить до нужного потребителю уровня. Это передача увеличивает стоимость сгенерированной энергии в два-три раза. В солнечной энергетике ситуация другая. Энергию можно производить непосредственно у потребителя. Но в автономных солнечных электростанциях необходимо использовать накопители энергии.

Как правило, накопителями энергии в солнечной энергетике являются тяго-



⚡ Для АЭС установленный 1 Вт обходится в \$6–7, что более чем в 30 раз дороже фотовольтаики

вые свинцово-кислотные аккумуляторы, выполненные по технологии Absorbent Glass Mat (AGM). В процессе эксплуатации в уральском регионе эмпирически сложилось соотношение между мощностью солнечных панелей и ёмкостью аккумуляторов: на 100 Вт мощности панелей должно приходиться не менее 100 А·ч ёмкости аккумулятора. Это соотношение зависит от режима использования, условий эксплуатации и других факторов. В денежном выражении это означает, что стоимость накопителей энергии составляет 75% от общей стоимости АСЭС.

На самом деле это соотношение ещё больше, поскольку за срок службы панелей (30 лет) придётся заменить не один комплект аккумуляторов (срок службы 400–500 циклов или четыре-шесть лет). Таким образом, стоимость электроэнергии для потребителя АСЭС увеличивается в четыре-пять раз. Следовательно, снижение стоимости накопителей — самая главная и самая «дорогая» проблема солнечной энергетике.

Свинцово-кислотные аккумуляторы, изготовленные по технологии AGM, не са-

мые лучшие из представленных, а наименее худшие. В опытной эксплуатации были исследованы несколько видов аккумуляторов. Щелочные никель-кадмиевые аккумуляторы допускают «полный разряд», прекрасно ведут себя в холода, но требуют режим заряда, который солнечные панели выдать не могут, также в них присутствует «эффект памяти». Самые доступные свинцово-кислотные аккумуляторы — стартерные, но при малых токах они подвержены сульфатации. Тяговые панцирные аккумуляторы дороги, для

**В уральском регионе в процессе эксплуатации эмпирически сложилось соотношение между мощностью солнечных панелей и ёмкостью аккумуляторов: на 100 Вт мощности панелей должно приходиться не менее 100 А·ч ёмкости аккумулятора. То есть стоимость накопителей энергии составляет 75% от общей стоимости АСЭС**

реализации заявленных изготовителем параметров (15 лет службы, 1500 циклов) требуют применения особо чистого электролита и пробки рекомбинации водорода. Литий-ионные аккумуляторы в испытаниях не участвовали по той причине, что несовместимы с холодами. Общими недостатками химических накопителей энергии можно считать ограниченный срок службы, узкий рабочий температурный диапазон, высокую цену (относительно стоимости панелей).

Существуют и другие технологии накопления энергии. Например, хранение энергии в виде сжатого воздуха. Несмотря на предполагаемую простоту, эта технология обладает ключевым недостатком — при сжатии воздух нагревается, при расширении охлаждается, что существенно снижает КПД накопления. Требуется компрессор, генерирующее устройство и ёмкость высокого давления. Из достоинств — всепогодность. Накопители на основе конденсаторов не могут хранить энергию долго, накопители на ионисторах не могут дать приемлемый ток.

В процессе поиска идеального накопителя энергии внимание привлекали возможности маховика. Этот накопитель обладает большим сроком службы, всепогоден, недорог в производстве. Теоретически маховик способен хранить энергию с плотностью до 4000 Вт·ч/кг, что на порядок превышает известные химические аккумуляторы. Маховики были очень популярны несколько десятилетий назад [2]. Долгое время их пытались использовать на транспорте для экономии энергии в режиме «разгон-торможение», но из-за гироскопического эффекта технология не нашла применения. Сейчас, с развитием солнечных технологий, появился быстро растущий рынок, где для маховичного накопителя не требуется перемещение в пространстве.

Известны действующие отечественные и зарубежные маховики, но они не подходят для применения в нише мощностей до 1,5 кВт. Одни слишком велики (сотни килограмм и десятки киловатт), другие предназначены для стабилизации частоты сети в энергосистемах переменного тока.

На основании опыта эксплуатации АСЭС были выработаны технические условия для маховика, который может занять значительное место на рынке солнечной энергетики. Масса — до 25 кг, плотность накопления энергии — более 10 Вт·ч/кг, рабочий диапазон температур от  $-40$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ , срок службы — 20 лет, ёмкость от 100 до 500 Вт·ч. Предполагается, что такой маховик может работать совместно с химическим накопителем энергии, «сглаживая» пики потребления таким образом, чтобы не использовались ограниченные циклы аккумулятора.

В зависимости от режима работы, такой маховик может экономить до половины циклов «заряд-разряд» аккумулятора, увеличивая его срок службы и, соответственно, снижая долю стоимости накопителей в АСЭС.

В работе маховика есть естественное ограничение — прочность материала тела маховика. При большой скорости вращения центробежные силы стремятся разрушить маховик, что представляет определённую проблему, для решения которой требуются современные дорогостоящие

**На основании опыта эксплуатации АСЭС были выработаны ТУ для маховика, который может занять значительное место на рынке солнечной энергетики. Это масса до 25 кг, плотность накопления энергии более 10 Вт·ч/кг, рабочий диапазон температур от  $-40$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ , срок службы — до 20 лет, ёмкость от 100 до 500 Вт·ч**

материалы. Но существует техническое решение, которое, по замыслу авторов, позволит обойти это ограничение.

В настоящее время разработана и проходит испытание конструкция со следующими параметрами: число оборотов —  $26022\text{ мин}^{-1}$ , плотность энергии —  $1,04\text{ Вт·ч/кг}$ , номинальное напряжение — 12 В постоянного тока. С момента начала проектирования характеристики устройства значительно улучшились, например, достигаемая плотность энергии возросла в пять раз (от первоначальной величины  $0,2\text{ Вт·ч/кг}$ ). Видны пути, которые позволяют и далее увеличивать плотность энергии и снижать стоимость накопителя. В конструкции применён магнитный подвес на редкоземельных магнитах.

Попробуем сравнить в первом приближении свинцово-кислотный аккумулятор и маховик.

Рассмотрим объём энергии, который может быть принят и отдан свинцово-кислотным аккумулятором с технологией AGM ёмкостью 100 А·ч на протяжении всего жизненного цикла. Срок службы такого аккумулятора составляет 400 циклов при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ . Изменение температуры в одну или другую сторону не увеличивает срок жизни устройства. С учётом погрешностей можно считать, что за свой жизненный цикл такой аккумулятор сможет переработать

$1,2\text{ кВт·ч} \times 400\text{ циклов} = 480\text{ кВт·ч}$  при стоимости устройства порядка \$200.

Таким образом, стоимость хранения 1 кВт·ч электроэнергии можно оценить в \$0,42 за 1 кВт·ч. Если принять, что время зарядки составляет шесть часов, а время разрядки — два часа, то при непрерывном режиме эксплуатации аккумулятор прослужит 3200 часов.

Произведём подобный расчёт для условного маховичного накопителя. Предположим, что время заряда (и разряда) составляет 0,5 часа. Цикл составляет один час. Условная цена — те же \$200. Оценим запасаемую энергию в 0,1 кВт·ч. Срок службы — 20 лет, что соответствует 175,2 тыс. циклов или 17,52 МВт·ч. Итого стоимость хранения — \$0,011 за 1 кВт·ч. Даже с учётом всех допущений получается, что кинетической накопитель позволяет хранить энергию на порядок выгоднее, чем свинцово-кислотный аккумулятор.

Совместная работа маховика и аккумулятора позволит получить синергетический эффект и снизить стоимость накопления энергии в АСЭС — главной проблеме солнечной энергетики.

## Выводы

Накопитель энергии — самая дорогая часть автономных солнечных электростанций. Снизить долю стоимости накопителей в общей стоимости позволяет накопитель на основе маховика. При совместной работе свинцово-кислотного аккумулятора и маховика возможно объединить преимущества каждого устройства и снизить стоимость накопления энергии. На основе опыта эксплуатации АСЭС можно считать перспективной конструкцию маховика массой до 25 кг, ёмкостью 0,1–0,5 кВт·ч и плотностью энергии выше 10 Вт·ч/кг. При этом ожидается увеличение срока службы свинцово-кислотного аккумулятора в два раза. ●

1. Лоссе У., Андреева Т., Брюкманн Р., Таллат-Кельпшайте Ю., Блайн К., Урбшат К. Возможности для солнечной энергетики в России. Доклад Eclareon GmbH. — Берлин, Германия: Eclareon GmbH, 2019. 113 с.
2. Гулиа Н.В. Накопители энергии. — М.: Наука, 1980. 150 с.

References — see page 95.



## Кинетические накопители энергии для ЖКХ Европы

Ещё в 2015 году американская компания Stornetic объявила о запуске в коммерческую эксплуатацию устройства DuraStor — своего первого накопителя кинетической энергии. Платформой для «обкатки» новинки были выбраны муниципальные жилищно-коммунальные предприятия города Мюнхена (Stadtwerke München), где DuraStor используется как «виртуальная» электростанция. Ввиду быстро меняющихся условий на европейском рынке электроэнергии разнообразные её накопители, включая кинетические, считаются ключевым инструментом обеспечения устойчивости и стабилизации электрических сетей.

Блок накопления энергии Stornetic DuraStor вырабатывает до 600 кВт·А при мощности около 100 кВт·ч. Устройство состоит из 28 маховиков, которые могут быть ускорены до скоростей в 45 тыс.  $\text{мин}^{-1}$ . Аккумулятор является полностью кинетическим, то есть функционирует без использования химикатов — электроэнергия сохраняется в виде механической энергии с помощью ускоряющего ротора. Во время рециркуляции вращающийся ротор замедляется и действует как генератор, вырабатывая электрическую энергию.

**Compact kinetic energy storage. Pp. 90–92.**

**Mikhail E. Pavlichenko**, railway engineer (electrical officer), director of "DDK", LLC;  
**Yulia O. Malozemova**, Master of Economics, general director of "Lodela", LLC

- 
1. Lohse Ulf, Andreeva T., Brückmann R., Tallat-Kelpšaitė Ju., Blajin Cr., Urbschat Chr. *Voz-mozhnosti dlja solnechnoj jenergetiki v Rossii* [Enabling PV in Russia]. Report by Eclareon GmbH. Berlin, Germany. *Eclareon GmbH*. 2019. 113 p. [In Russian]
  2. Gulia N.V. *Nakopiteli jenergii* [Energy storage devices]. Moscow. *Nauka* ["Science" Publishing House]. 1980. 150 p. [In Russian]