

## Эффективность применения накопителей электроэнергии как резервного источника электроэнергии

**В. Б. Шлейников,**

*Оренбургский государственный университет, кандидат технических наук*

*Рассмотрены вопросы резервирования ответственных электроприемников с помощью источников с накопителями электроэнергии. Сделано предположение об эффективности такого резервирования для микросистем электроснабжения в сравнении с резервной линией электропередачи. Предложено выполнить сравнение стоимости резервирования, используя в качестве основных критериев сравнения расстояние от резервного источника и стоимость аккумулятора. Практическим расчетом с использованием общепринятых методик подтверждена эффективность резервирования с помощью накопителей электроэнергии для систем с аккумуляторной батареей до 200 А·ч.*

**Ключевые слова:** накопитель электроэнергии, электроснабжение, аккумулятор, экономическая целесообразность.

Использование стационарных накопителей электроэнергии предполагает решение различных задач. Среди таких задач – резервирование ответственных электроприемников, выравнивание графиков электрических нагрузок, корректировка показателей качества электроэнергии, регулирование частоты, управление работой энергосистемы в установившихся и переходных режимах с целью обеспечения устойчивости, регулирование напряжения в сетях и др. [1, 2]. Изменения в области информационных технологий, связанные с развитием электрических сетей нового поколения Smart Grid, добавили еще одну задачу в потенциально решаемые с применением накопителей электроэнергии – построение «умных» сетей [3]. И наконец, используемые в составе комплекса оборудования возобновляемых источников энергии накопители решают задачу разделения выработки и использования электроэнергии в течение суток, обеспечивая работу энергосистемы в режиме распределенной генерации [4]. При этом разработка системы электроснабжения, реализующей некоторые из обозначенных задач, часто оказывается нерациональной с точки зрения величины затрат на ее сооружение.

Определению экономических показателей систем электроснабжения с накопителями электроэнергии посвящен ряд публикаций, в которых приводятся как частные случаи расчета, так и обобщенные методики определения экономической эффективности. В [5] выполнена оценка границы экономически целесообразных значений удельных капиталовложений в техническую систему накопления энергии, предназначенную решать задачу выравнивания суточного графика нагрузки для заданных стоимостных показателей генерации. В приводимом примере показано, что эффект от работы установок накопления электроэнергии достигается при их использовании в течение 300 суток и времени зарядки по 6–8 часов в день.

Статья [6] посвящена вопросу эффективной эксплуатации микрогидроэлектростанций, в частности в системе с накопителями электроэнергии на базе свинцово-кислотных аккумуляторов. Отмечаются сопоставимые показатели приведенных затрат эксплуатации системы; стоимость выработанной электроэнергии микроГЭС с накопителями электроэнергии имеет незначительные колебания относительно стоимости аналогичной установки без накопителей. В [7] сделан вывод о снижении срока окупаемости систем электроснабжения с накопителями электроэнергии при использовании разработанных алгоритмов управления. Срок окупаемости может составить от 2 до 5 лет. В целом в публикациях, посвященных использованию накопителей электроэнергии, наблюдается ожидание снижения стоимости самих накопителей и систем, построенных с использованием накопителей электроэнергии. Такой вывод делается в [8].

Наряду с ожиданием снижения стоимости элементной базы, рассмотрение задачи резервирования одиночных маломощных электроприемников является безальтернативным. Однако увеличение количества и мощности резервируемых электроприемников при их незначительной удаленности от источников гарантированного электроснабжения может привести к тому, что использование накопителей электроэнергии будет невыгодным, а модернизация существующей энергосистемы (прокладка резервной линии электропередачи и установка резервного трансформатора) окажется более эффективным решением.

Рассматривая микросистему с накопителями электроэнергии емкостью 30–200 А·ч, наметим ряд ограничений:

- вопросы мобильности для аккумуляторной батареи отсутствуют;
- при резервном электроснабжении нескольких стационарных электроприемников от накопителя

электроэнергии на первый план выходят экономические показатели;

- сохраняется цикличность электропотребления, связанная с ритмами жизнедеятельности человека;

- появляется составляющая электропотребления, связанная с особенностями работы устройств и систем автоматики.

Цель настоящей работы – определить параметры накопителя электроэнергии, при которых сохраняется эффективность от его использования в качестве резервного источника питания. Соответственно, задачи можно сформулировать следующим образом:

1. Определение затрат на сооружение немобильного резервного источника с накопителем электроэнергии.

2. Сравнение затрат на источник резервирования с накопителем электроэнергии с затратами на сооружение резервного источника электроснабжения с помощью традиционной схемы (ЛЭП, установка второго трансформатора, установка автоматического ввода резерва).

Предварительный выбор емкости аккумулятора выполним исходя из условия необходимой продолжительности работы оборудования [9]:

$$W_{\text{акб}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot \Delta T}{\text{DOD}},$$

где  $W_{\text{акб}}$  – требуемая емкость аккумулятора, А·ч;

$P_{\text{н}}$  – мощность резервируемой нагрузки, Вт;

$\Delta T$  – время резервирования, ч;

DOD – допустимый уровень разряда батареи, В.

Уточнение параметров аккумулятора для использования в качестве накопителя электроэнергии резервного источника выполним с соблюдением следующих начальных условий [10]:

1. Нормированная предельная величина разряда аккумулятора.

2. Нормированный разрядный ток аккумулятора выбирается на основании расчета нагрузки.

Таким образом, получаем условия, наиболее значимые для выбора аккумулятора:

$$\begin{cases} k = \frac{W_{\text{р}}}{W_{\text{н}}}, \\ W_{\text{р}} = I_{\text{р}} \cdot t_{\text{р}}, \end{cases}$$

где  $k$  – коэффициент разряда;

$W_{\text{р}}$  – разряжаемый объем;

$W_{\text{н}}$  – номинальный объем;

$I_{\text{р}}$  – разрядный ток;

$t_{\text{р}}$  – время разряда.

Факторы, влияющие на стоимость резервной системы электроснабжения на основе батарей аккумуляторов:

- мощность потребителей, подлежащих резервированию;

- время, на которое обеспечивается резерв электроснабжения.

Факторы, влияющие на стоимость резервной системы электроснабжения на основе линии электропередачи 10 кВ и силового трансформатора или линии электропередачи 0,4 кВ, – это расстояние от источника питания до объекта электроснабжения и мощность потребителей, подлежащих резервированию. Обозначения перечисленных факторов выполним аналогично обозначениям в [11]:

$p_i$  – мощность  $i$ -го резервируемого потребителя;

$t_i$  – время обеспечения резерва  $i$ -го резервируемого потребителя;

$l_i$  – расстояние от источника питания до объекта электроснабжения.

Затраты на резервную систему электроснабжения, выполненную на основе накопителей электроэнергии, составят, ден. ед.:

$$Z_{\text{нб}} = \sum f(p_i \cdot t_i). \quad (1)$$

Стоимость резервирования посредством линии электропередачи, ден. ед.:

$$Z_{\text{ЛЭП}} = \sum f(p_i \cdot l_i). \quad (2)$$

Приравняв выражения (1) и (2), получим:

$$\sum f(p_i \cdot t_i) - \sum f(p_i \cdot l_i) = 0. \quad (3)$$

Параметр «мощность  $i$ -го потребителя», подлежащего резервированию, будет вынесен за скобки. Другим значимым параметром для стоимости резервной системы на основе аккумуляторов является время резервирования, а для резервной системы на основе линии электропередачи – расстояние от источника питания до потребителя.

Таким образом:

$$\sum p_i (f(t_i) - f(l_i)) = 0. \quad (4)$$

Сравнение показателей линии электропередачи 0,4 кВ выполнено с использованием методов и некоторых данных, приведенных в [12]. В данной статье приведена диаграмма, демонстрирующая превышение затрат на строительство новой ЛЭП 6–10 кВ в сравнении с установкой накопителя электроэнергии на базе свинцово-кислотного аккумулятора при удаленности рассматриваемого объекта от центра электроснабжения.

Определение стоимости резервного источника на основе накопителя электроэнергии выполним общепринятым способом, суммируя стоимость аккумуляторных батарей и стоимость инвертора. Дополнительные расходы на проектирование, монтаж, доставку и обслуживание примем в размере 5 % от стоимости оборудования. Стоимость резервного источника энергии составит:

$$C_{\text{нб}} = (C_{\text{акб}} + C_{\text{инв}}) \cdot C_{\text{доп}}, \quad (5)$$

где  $C_{\text{акб}}$  – стоимость аккумуляторной батареи;

$C_{\text{инв}}$  – стоимость инвертора;

$C_{\text{доп}}$  – дополнительные расходы.

Определение стоимости линии электропередачи выполнено согласно [13] по формуле:

$$C_{\text{ЛЭП}} = \left[ \left( \text{НЦС}_i \cdot M \cdot K_{\text{пер}} \cdot K_{\text{пер/зона}} \cdot K_{\text{рег}} \right) + Z_p \right] \cdot I_{\text{пр}} + \text{НДС}, \quad (6)$$

где  $\text{НЦС}_i$  – выбранный показатель с учетом функционального назначения объекта и его мощностных характеристик;

$M$  – мощность объекта капитального строительства;

$K_{\text{пер}}$  – коэффициент перехода от цен базового района к уровню цен субъектов Российской Федерации;

$K_{\text{пер/зона}}$  – коэффициент перехода для отдельных территориальных зон;

$K_{\text{рег}}$  – коэффициент, учитывающий регионально-климатические условия;

$Z_p$  – дополнительные затраты;

$I_{\text{пр}}$  – индекс-дефлятор, определенный по отрасли;

НДС – налог на добавленную стоимость.

Для получения результата были использованы данные для ряда оборудования, входящего в состав источника с накопителем электроэнергии [14, 15]. В том числе:

– инвертор Powerman Smart 500,  $S_n = 500$  В·А,  $P_n = 300$  Вт. Стоимость на III квартал 2020 г.: 8399 руб.;

– аккумуляторная батарея Delta DTM 12100 L емкостью 100 А·ч и напряжением 12 В. Стоимость на III квартал 2020 г.: 17 293 руб.

Данное оборудование работало на нагрузку, представляющую собой электроприемники типовой котельной для отопления индивидуального жилого дома и нагрев воды. Была проанализирована необходимость бесперебойной работы каждого электроприемника, и исходя из результатов была назначена категория надежности. Выбранное для резервирования оборудование приведено в табл. 1.

Учитывая особенности работы котла Вахi Slim (попеременное включение насоса загрузки бойлера и котлового насоса), насос с меньшей мощностью учитывать не будем. Параметры электропотребления для приведенного состава оборудования приведены в табл. 2.

При указанных параметрах электропотребления и различных значениях емкости аккумулятора определено приблизительное время работы резервного источника в зависимости от нормированной величины разряда аккумулятора. Значение времени работы при различной нормированной величине разряда, а также ориентировочная стоимость аккумулятора (на середину 2020 г.) приведены в табл. 3.

В табл. 4 приведены данные о величине располагаемой энергии разряда аккумуляторной батареи.

Таблица 1

### Список резервируемого оборудования

Наименование оборудования	Количество, шт.	$P_n$ , Вт
Котел Вахi Slim 30 кВт без дополнительного оборудования	1	20
Насос Grundfos UPS 32-40 (котловой)	1	40
Насос Grundfos ALPHA2 25-60 (группа – радиаторы)	1	60
Насос Grundfos ALPHA2 L 25-60 (группа – теплые полы)	1	60
Насос Grundfos ALPHA2 L 25-40 (группа – подвал)	1	40
Насос Grundfos UPS 25-60 (бойлер, загрузка)	1	60
Сигнализатор загазованности Seitron	1	5
Итого	7	285

Таблица 2

### Параметры электропотребления

Параметр	Значение	Единица измерения
Мощность	245	Вт
Разрядный ток для 230 В	1,07	А
Разрядный ток для 12 В	20,42	А
Расход электроэнергии	5880	Вт·ч
Потребная емкость аккумулятора	490	А·ч

Таблица 3

Время работы аккумулятора различной емкости при различной нормированной величине разряда

Стоимость аккумулятора	Емкость аккумулятора	Нормированная величина разряда, %									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
3 355	17	0,07	0,14	0,21	0,29	0,36	0,43	0,50	0,57	0,64	0,72
5 994	26	0,11	0,22	0,33	0,44	0,55	0,66	0,77	0,88	0,99	1,09
6 682	33	0,14	0,28	0,42	0,56	0,69	0,83	0,97	1,11	1,25	1,39
9 648	40	0,17	0,34	0,51	0,67	0,84	1,01	1,18	1,35	1,52	1,68
10 778	55	0,23	0,46	0,69	0,93	1,16	1,39	1,62	1,85	2,08	2,32
14 306	65	0,27	0,55	0,82	1,09	1,37	1,64	1,92	2,19	2,46	2,74
15 242	75	0,32	0,63	0,95	1,26	1,58	1,89	2,21	2,53	2,84	3,16
18 180	90	0,38	0,76	1,14	1,52	1,89	2,27	2,65	3,03	3,41	3,79
18 648	100	0,42	0,84	1,26	1,68	2,11	2,53	2,95	3,37	3,79	4,21
22 032	120	0,51	1,01	1,52	2,02	2,53	3,03	3,54	4,04	4,55	5,05
36 302	200	0,84	1,68	2,53	3,37	4,21	5,05	5,89	6,74	7,58	8,42

Таблица 4

Величина располагаемой энергии аккумулятора при различных уровнях разряда аккумулятора

Параметр	Значение									
Величина разряда, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Ресурс, ч	0,42	0,84	1,26	1,68	2,11	2,53	2,95	3,37	3,79	4,21
Количество циклов, ед.	1400	1300	1200	800	500	400	350	310	290	270
Режим работы	Буферный	Буферный	Буферный	Циклический						
Обмен энергией, кВт	0,42	1,68	3,79	6,74	10,53	15,16	20,63	26,9	34,1	42,11

Условно принято, что при увеличении глубины разряда аккумулятора его режим работы переходит из буферного в циклический.

Определение стоимости устройства резервирования выполнено с использованием выражения (5). Стоимость оборудования с учетом монтажа составила 26 976,6 руб.

Определение стоимости резервирования с помощью двухцепной линии электропередачи выполнялось согласно [13] по формуле (6). Была определена разница стоимости строительства одноцепной и двухцепной линии электропередачи, а также стоимость пропуска количества электроэнергии, необходимого для питания резервируемого оборудования. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты определения стоимости ЛЭП 0,4 кВ различной длины

Показатель стоимости	Длина ЛЭП, км					
	1	2	3	4	5	10
Стоимость одноцепной линии 0,4 кВ, тыс. руб.	908,07	1816,15	2724,22	3632,30	4540,37	9080,75
Стоимость двухцепной линии 0,4 кВ, тыс. руб.	1267,88	2535,75	3803,63	5071,50	6339,38	12 678,76
Разница, тыс. руб.	359,80	719,60	1079,40	1439,21	1799,01	3598,01
Стоимость пропуска, тыс. руб.	0,795	3,181	7,157	12,724	19,881	79,522

Сравнение этого значения и стоимости оборудования для резервирования на основе накопителя электроэнергии с аккумулятором емкостью до 200 А·ч показывает, что при линии длиной до 1 км резервирование на основе источника с накопителями электроэнергии оказывается экономически эффективнее, чем строительство двухцепной ЛЭП вместо одноцепной.

Возможность обеспечения резервирования для ответственных и особо ответственных электроприемников остается наиболее весомым аргументом при выборе накопителей электроэнергии с аккумуляторными батареями в качестве второго независимого источника электроэнергии для группы потребителей. Данные (табл. 3 и табл. 5), указывающие на эффективность уменьшения емкости аккумуляторов, позволяют получить инструмент

снижения стоимости систем с накопителями электроэнергии за счет разделения мощности установок путем ее дробления между отдельными потребителями.

Выбор источника с накопителями электроэнергии на основе аккумуляторных батарей емкостью до 200 А·ч является экономически эффективным решением резервирования для ответственных и особо ответственных электроприемников системы жизнеобеспечения индивидуального жилого дома мощностью до 300 Вт и временем автономной работы до восьми часов, поэтому рассмотрение централизованных установок с накопителями электроэнергии небольшой мощности в качестве резервного источника питания будет эффективнее варианта строительства резервной линии электропередачи.

## Литература

1. Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/9013>.
2. Никитин Д. В., Кузнецов О. Н. О применении накопителей электроэнергии в электроэнергетике // *Электричество*. – 2007. – № 9. – С. 52–60.
3. Илюшин П. В. Перспективы развития и принципы построения систем автоматического управления режимами микроэнергосистем // *Электроэнергетика глазами молодежи. Материалы конференции*. – Екатеринбург, 2019. – С. 59–64.
4. Куликов А. Л., Осокин В. Л., Папков Б. В. Проблемы и особенности распределенной электроэнергетики // *Вестник НГИЭИ*. – 2018. – № 11. – С. 123–136.
5. Чернецкий А. М. Оценка экономической эффективности использования накопителей электроэнергии в энергосистеме // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2013. – № 4. – С. 21–28.
6. Лукутин Б. В., Сарсикеев Е. Ж., Шандарова Е. Б. Оценка технико-экономической эффективности использования накопителей электроэнергии в автономной гидроэлектростанции // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2. – Ч. 2. – С. 145.
7. Орлов А. И., Воробьев К. М., Гарипов И. Х., Самойлов К. А. Снижение стоимости электроэнергии для потребителей за счет использования накопителей энергии // *Вестник Чувашского университета*. – 2020. – № 1. – С. 123–135.
8. Рынок систем накопления электроэнергии в России: Потенциал развития. Экспертно-аналитический доклад [Электронный ресурс]. Код доступа: [https://www.rusnano.com/upload/images/sitefiles/files/Condenses\\_System\\_Markets\\_in-Russia.pdf](https://www.rusnano.com/upload/images/sitefiles/files/Condenses_System_Markets_in-Russia.pdf).
9. Обухов С. Г., Масолов В. Г. Двухконтурный накопитель энергии для гибридных электростанций с возобновляемыми источниками энергии // *Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность. Материалы IV Международного конгресса REENCON-XXI*. – Сколково, 2018. – С. 147–152.
10. Лукутин Б. В., Обухов С. Г., Шутов Е. А., Хошнау З. П. Применение буферных накопителей энергии для повышения энергоэффективности ветродизельных электростанций // *Электричество*. – 2012. – № 6. – С. 24а–29.
11. Буткина А. А., Белов В. Ф. Реализация модуля автоматизированного формирования вариантов использования различных источников энергии конечным потребителем // *Материалы XXII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева*. – Саранск, 2019. – С. 36–40.
12. Гусев Ю. П., Субботин П. В. Влияние накопителей электроэнергии на пропускную способность распределительных сетей напряжением 6–10 кВ // *Электричество*. – 2018. – № 1. – С. 13–18.

13. Укрупненные нормативы цены строительства НЦС 81-02-12-2020. Сборник № 12. Наружные электрические сети (приложение к Приказу Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30 декабря 2019 г. № 914/пр).

14. Официальный сайт компании Delta. Каталог аккумуляторных батарей (АКБ) марки Delta Battery [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://www.delta-battery.ru/catalog>.

15. Официальный сайт компании Powerman [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://powerman.ru>.

#### Efficiency of energy storage devices as a backup power sources

V. B. Shleynikov,  
Orenburg State University, Russia, PhD

*Energy storage technology offers a number of economic and environmental benefits. This paper provides an analysis of power grid backing up solutions with energy storage devices assuming that energy storage backing up can be generally more efficient for microgrids than conventional reserving options. Cost-effectiveness and a distance to a backup source have been accepted as criteria for comparing. For power supply systems of 200 AH, the energy storage backup efficiency has been proven by appropriate computations as reflected in this paper,*

**Keywords:** *energy storage device, power supply, battery, economic feasibility.*