

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.55>**К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ И ДИЗЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА В СОСТАВЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

Научная статья

Ким К.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-6622-2040;<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (kim.kch[at]mail.ru)

**Аннотация**

Рассмотрены вопросы оптимизации работы накопителя энергии и дизельного генератора в составе локальной энергосистемы на основании данных о расходе топлива дизельного генератора и по результатам моделирования работы накопителя энергии. Получены соотношения для оценки стоимости выработки электроэнергии с учетом соотношения мощности дизельного генератора с расходом топлива. Разработана модель и проведены исследования по оценке степени сокращения срока службы накопителя энергии в соответствии с увеличением числа циклов заряда-разряда. Представлен метод оптимизации работы накопителя энергии и дизельного генератора с примером применения его к виртуальной автономной локальной энергосистеме. Показано, что предложенный метод оптимизации работы может быть эффективно применен для оптимальной работы накопителя энергии и дизельного генератора в составе локальной энергосистемы.

**Ключевые слова:** локальная энергосистема, возобновляемые источники энергии, дизельный генератор, накопитель энергии, аккумуляторная система, оптимизация работы, стоимость выработки электроэнергии.

**ON THE OPTIMIZATION OF ENERGY STORAGE AND DIESEL GENERATOR OPERATION WITHIN THE LOCAL POWER SYSTEM**

Research article

Kim K.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-6622-2040;<sup>1</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

\* Corresponding author (kim.kch[at]mail.ru)

**Abstract**

The issues of optimization of energy storage and diesel generator operation in the local power system on the basis of data on diesel generator fuel consumption and by the results of energy storage operation modeling are reviewed. The relations for estimating the cost of power generation, in accordance with the ratio of the diesel generator capacity to fuel consumption are obtained. The model is developed and the research of estimation of degree of reduction of service life of energy storage device according to the increase of number of charge-discharge cycles is carried out. The method of optimization of energy storage and diesel generator operation is presented with the example of its application to virtual autonomous local power system. It is shown that the proposed method of optimization of operation can be effectively applied to the optimal operation of energy storage device and diesel generator as a part of local power system.

**Keywords:** local power system, renewable energy sources, diesel generator, energy storage, battery system, optimization of operation, cost of power generation.

**Введение**

В локальных энергосистемах (ЛЭС) на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в качестве резервного или вспомогательного источника питания часто используют дизельный генератор (ДГ). Это обеспечивает надёжное и бесперебойное электроснабжение потребителей в том случае, когда возникают проблемы с выработкой электроэнергии за счет ВИЭ, таких, как солнечная энергия и энергия ветра. Технические и экономические вопросы обеспечения минимальной стоимости выработки электроэнергии при балансировании спроса и предложения энергии обычно решаются с помощью накопителей энергии (НЭ), в частности, аккумуляторной системы накопления энергии (АСНЭ) [1].

Важную роль в такой энергосистеме играют вопросы обеспечения оптимальной работы АСНЭ, учитывающие эффект сокращения их срока службы в зависимости от увеличения количества зарядок и разрядов, интенсивность графиков запуска и остановки ДГ, объем финансовых затрат на оказание услуг по электроснабжению [2].

Вопросам эксплуатации ЛЭС с точки зрения оптимального использования накопителей энергии, а также исследованию зарядно-разрядных характеристик свинцово-кислотных и литиевых аккумуляторов на их срок службы посвящено достаточное количество работ, например [3], [4], [5].

В вышеперечисленных работах существующие методы расчета экономической составляющей процесса эксплуатации ЛЭС предполагают, что стоимость выработки электроэнергии ДГ постоянна для всех, в том числе оптимального, режимов работы. Известно, что при работе ДГ на малой мощности коэффициент полезного действия (КПД) существенно падает. Следовательно, представляется целесообразным увеличивать мощность ДГ до значений, соответствующих высоким КПД, запасать электроэнергию в НЭ, а затем разряжать ее при необходимости.

При отсутствии НЭ мощность ДГ выбирается по максимальному значению нагрузки. Соответственно, эффективность использования установленной мощности будет незначительна, что соответствует повышенному удельному расходу топлива и росту себестоимости электроэнергии. Средняя мощность нагрузки при этом, как правило, значительно меньше установленной мощности ДГ.

Применение систем накопления энергии на ЛЭС позволяет сглаживать отклонения мощности от среднего значения. Отсюда возникает возможность снижения установленной мощности ДГ вплоть до среднего значения нагрузки, что может привести к экономии топлива.

В статье предлагается способ анализа работы НЭ и ДГ в составе локальной энергосистемы, позволяющий обозначить пути по оптимизации расхода топлива ДГ, а также стоимости выработки электроэнергии. Исследование проведено путем моделирования процессов работы АСНЭ, включающих анализ характеристик расхода топлива по отношению к мощности ДГ. Результаты работы позволяют оценить степень сокращения срока службы накопителя энергии в зависимости от увеличения числа циклов заряда/разряда. Эффект оптимизации проверен путем анализа работы виртуальной автономной ЛЭС.

### Моделирование ЛЭС для оптимальной работы АСНЭ и ДГ

Дизельные генераторы широко используются в качестве источников питания для пиковых нагрузок в ЛЭС. Однако доставка топлива, необходимого для работы ДГ, осуществляется из удаленных центров, что делает его эксплуатацию дорогостоящей. Качество вырабатываемой электроэнергии напрямую зависит от стабильности работы двигателя, поэтому он должен вращаться с постоянной скоростью. При эксплуатации ЛЭС этот факт может рассматриваться как основной недостаток ДГ, поскольку генератор может быть очень неэффективен в зависимости от режима работы.

В связи с этим, одной из основных задач для ЛЭС, использующих ДГ для выработки электроэнергии, является поиск оптимальных вариантов энергоснабжения и экономии топлива.

В таблице 1 представлены данные по расходу топлива для ДГ мощностью от 60 до 610 кВт при различной нагрузке [6].

Таблица 1 - Расход топлива ДГ

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.55.1>

Степень загрузки от номинальной, %	5%	25%	50%	75%	100%
Номинальная мощность (кВт)	Расход топлива (л/час)				
60	2,55	6,4	9,4	13,1	18,1
90	3,64	8,9	13,6	19	24,7
130	4,02	11,4	18,1	24,9	32,5
175	4,91	13,8	24,9	34,9	45,8
200	6,21	15,1	25,1	37,7	50,6
250	7,19	18,3	32,6	47,1	63,3
275	7,95	20,3	36,2	52,3	70,3
300	7,61	20,6	37	56	73,8
330	8,69	23	41,5	61,3	84,1
360	11,43	24,5	46	68	93,3
400	12,01	28	50,6	74,7	102,5
450	13,61	33,5	56,7	84,6	115
500	14,78	34,9	63,3	93,4	128,2
550	14,65	39,1	69,1	106,2	144,4
610	15,40	41,9	75,9	112	153,9

Анализ приведенных в таблице 1 данных показывает, что расход топлива ДГ существенно зависит от вырабатываемой мощности. Например, при изменении нагрузки от 100 до 5% мощности в несколько раз увеличивается расход топлива на единицу мощности, который тесно связан с эффективностью производства электроэнергии.

Выбор установленной мощности ДГ опирается на расчетные значения нагрузок, которые могут быть как бытовыми, так и промышленными. Для промышленных нагрузок характерно наличие пусковых режимов, для которых необходимо учитывать пусковые токи. Это означает, что для нормальной работы генератора при пуске электроустановок, имеющих высокие величины пускового тока, мощность должна быть выше. Если мощность генератора подобрана неверно, то возникает перегрузка генератора, что приводит к снижению срока эксплуатации из-

за длительной работы на предельных режимах и большому расходу топлива. Примем, что расход мощности при 75% мощности соответствует единице. Пересчитаем данные расхода топлива, приведенные в таблице 1 в относительные единицы (см. таблицу 2).

Таблица 2 - Соотношение расхода топлива на единицу мощность ДГ

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.55.2>

Степень загрузки от номинальной, %	5%	25%	50%	75%	100%
Номинальная мощность (кВт)	Соотношение расхода топлива на единицу мощности				
60	2,93	1,47	1,08	1	1,04
90	2,87	1,41	1,07	1	0,98
130	2,42	1,37	1,09	1	0,98
175	2,11	1,19	1,07	1	0,98
200	2,47	1,20	1,00	1	1,01
250	2,29	1,17	1,04	1	1,01
275	2,28	1,16	1,04	1	1,01
300	2,04	1,10	0,99	1	0,99
330	2,13	1,13	1,02	1	1,03
360	2,52	1,08	1,01	1	1,03
400	2,41	1,12	1,02	1	1,03
450	2,41	1,19	1,01	1	1,02
500	2,37	1,12	1,02	1	1,03
550	2,07	1,10	0,98	1	1,02
610	2,06	1,12	1,02	1	1,03

Полученные данные позволяют провести оценку эффективности работы ДГ при различных уровнях загрузки.

Используя метод наименьших квадратов, на основе данных в таблице 2 составим соотношение для расчета стоимости выработки электроэнергии ДГ в виде кубической формулы:

$$y = (-0,9498x^3 + 2,3945x^2 - 1,9253x + 1,4978) * C \quad (1)$$

где  $x$  – отношение мощности к номинальной мощности ДГ;

$C$  – стоимость выработки электроэнергии ДГ при 75% мощности;

$y$  – стоимость выработки электроэнергии ДГ при соответствующем соотношении мощности  $x$ .

Удешевления стоимости выработки электроэнергии можно достичь путем перехода дизель-генератора на режимы с оптимальным КПД. Для того, чтобы понизить суточный расход топлива, целесообразно так организовать подзарядку накопителя электроэнергии, чтобы в течение суток максимально поднять выработку мощности ДГ.

В процессе исследования рассмотрены режимы накопления энергии из ВИЭ в АСНЭ в следующих случаях: - когда электроэнергия ЛЭС достаточна и пополнения мощности за счет ранее заряженной электроэнергии АСНЭ не требуется, - когда электроэнергия ЛЭС недостаточна. Во втором случае следует учитывать возможность сокращения срока службы АСНЭ из-за повышения интенсивности процессов зарядки и разрядки. Для обеспечения стабильной работы недостаток электроэнергии в сети при большой нагрузке восполняется за счет принудительного питания от АСНЭ независимо от экономической целесообразности. Таким образом, электроэнергию, которая должна подаваться, целесообразно исключить из расчета затрат, связанных с сокращением срока службы АСНЭ. Стоимость сокращения срока службы АСНЭ из-за дополнительной зарядки и разрядки может быть выражена следующим образом:

$$C_{НЭ} = C_{умень} * \left( \sum_{n=1}^N B_{раз-t} - P_{коро} \right) \quad (2)$$

где  $C_{НЭ}$  – стоимость сокращения срока службы АСНЭ из-за дополнительной зарядки и разрядки;

$C_{умень}$  – стоимость сокращения срока службы на единицу электроэнергии АСНЭ из-за зарядки и разрядки [руб./кВт·ч];

$N$  – количество рабочих секций в день;

$B_{раз-n}$  – энергия разряда АСНЭ в секции  $n$  [кВт·ч];

$P_{\text{коро}}$  – недостаток электроэнергии в сети при большой нагрузке [кВт·ч].

Процесс разряда АСНЭ может быть осуществлен в пределах количества энергии, оставшейся в АСНЭ согласно следующему ограничению:

$$0 \leq B_{\text{раз-}n} \leq B_{\text{ост-(}n-1)} \quad (3)$$

где  $B_{\text{ост-(}n-1)}$  – энергия, оставшаяся в АСНЭ в секции  $n-1$  [кВт·ч].

Процесс заряда АСНЭ осуществляется в пределах следующих ограничений:

$$0 \leq B_{\text{зар-}n} \leq B_{\text{мак}} - B_{\text{ост-(}n-1)} \quad (4)$$

где  $B_{\text{мак}}$  – максимальная зарядная электроэнергия АСНЭ [кВт·ч];

$B_{\text{зар-}n}$  – энергия зарядки АСНЭ в секции  $n$  [кВт·ч].

Текущее состояние заряда АСНЭ с учетом коэффициента потерь может быть выражено следующим образом:

$$B_{\text{ост-}n} = \frac{B_{\text{ост-(}n-1)} - B_{\text{раз-}n}}{(1-L_{\text{раз}}) + B_{\text{зар-}n} * (1-L_{\text{зар}})} \quad (5)$$

где  $B_{\text{ост-}n}$  – энергия зарядки АСНЭ в секции  $n$  [кВт·ч];

$L_{\text{раз}}$  – коэффициент потерь при разрядке АСНЭ;

$L_{\text{зар}}$  – коэффициент потерь при заряде АСНЭ.

В процессе моделирования целесообразно использовать целевую функцию, позволяющую оптимизировать работу ЛЭС. В её состав следует включить соотношение по стоимости выработки электроэнергии ДГ в зависимости от мощности (1), а также выражение (2), учитывающее влияние снижения срока службы АСНЭ в зависимости от увеличения энергии зарядок и разрядов АСНЭ.

Целевая функция локальной энергосистемы для оптимальной работы ДГ и АСНЭ может быть выражена следующим образом:

$$J = \sum_{n=1}^N [C_{\text{ко}} * P_{\text{ког-}n} + C_{\text{д}} * (a_3 x_n^3 + a_2 x_n^2 + a_1 x_n + a_0) * P_{\text{дг-}n} + C_{\text{сг}} * P_{\text{сг-}n} + C_{\text{вг}} \quad (6)$$

где  $C_{\text{ко}}$  – стоимость выработки электроэнергии когенератором (КГ) [руб./кВт·ч];

$P_{\text{ког-}n}$  – выработка электроэнергии КГ в секции  $n$  [кВт·ч];

$C_{\text{д}}$  – стоимость выработки электроэнергии при 75% мощности ДГ [руб./кВт·ч];

$a_0, a_1, a_2, a_3$  – постоянные функции стоимости выработки электроэнергии ДГ ( $a_0=1,4978, a_1=-1,9253, a_2=2,3945, a_3=-0,9498$ )

$x_n$  – отношение мощности к номинальной мощности ДГ в секции  $n$ ;

$P_{\text{дг-}n}$  – выработка электроэнергии ДГ в секции  $n$  [кВт·ч];

$C_{\text{сг}}$  – стоимость выработки солнечной электроэнергии [руб./кВт·ч];

$P_{\text{сг-}n}$  – выработка солнечной электроэнергии в секции  $n$  [кВт·ч];

$C_{\text{вг}}$  – стоимость выработки электроэнергии ветрогенератором [руб./кВт·ч];

$P_{\text{вг-}n}$  – выработка электроэнергии ветрогенератором в секции  $n$  [кВт·ч];

$C_{\text{ст}}$  – стоимость запуска ДГ [руб.];

$\delta_{\text{ст-}n}$  – статус изменения запуска ДГ в секции  $n$  (1 при переходе с останова на пуск, 0 в противном случае).

Спрос на электроэнергию в секции  $n$  для оптимальной работы можно определить следующим образом:

$$P_{H-n} = P_{\text{дг-}n} + P_{\text{ког-}n} + P_{\text{сг-}n} + P_{\text{вг-}n} + B_{\text{раз-}n} - B_{\text{зар-}n} \quad (7)$$

где  $P_{H-n}$  – спрос на электроэнергию в секции  $n$  [кВт·ч].

Рассмотрим пример совместной работы ДГ и АСНЭ для ЛЭС, в состав которой входят солнечная и ветровая установки. Солнечная установка имеет мощность 200 кВт, ветровая – 100 кВт, а когенерация и дизельная энергия имеют мощность 250 кВт соответственно. Предполагается, что стоимость выработки электроэнергии составляет 0,47 руб./кВт·ч для солнечной энергии, 0,24 руб./кВт·ч для энергии ветра и 3,54 руб./кВт·ч и 4 руб./кВт·ч для когенерации и дизельной энергии, соответственно [7], [8]. Пропускная способность и характеристики АСНЭ приведены в таблице 3 [9], [10], [11].

Таблица 3 - Основные характеристики АСНЭ

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.55.3>

Номинальная мощность (кВт)	Емкость (кВт·ч)			Стоимость (руб./кВт·ч)
200	400	0,075	0,075	3753

Начальная зарядка (кВт·ч)	(руб./кВт·ч)	Срок службы заряда/разряда (цикл)	Естественная жизнь старения (год)
40	0,9	3 000	30

В таблице 4 приведены данные по выработке солнечной и ветровой энергии, а также сведения о нагрузке.

Таблица 4 - Данные о выработках солнечной и ветровой энергии и нагрузке ЛЭС

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.55.4>

Время (час)	Выработка солнечной энергии (кВт·ч)	Выработка ветровой энергии (кВт·ч)	Нагрузка (кВт·ч)
1	0,0	52,4	332,0
2	0,0	51,6	316,0
3	0,0	45,0	308,0
4	0,0	44,9	307,0
5	0,0	46,3	330,0
6	14,1	45,0	337,0
7	42,1	42,9	364,3
8	63,0	38,3	466,7
9	91,0	34,8	518,6
10	104,9	33,8	575,0
11	119,0	31,5	609,1
12	132,9	32,1	613,7
13	140,0	30,0	586,3
14	132,9	28,4	647,6
15	117,6	25,9	651,0
16	91,0	23,3	642,0
17	48,9	22,8	580,0
18	14,1	24,1	538,0
19	0,0	31,8	478,8
20	0,0	37,9	472,8
21	0,0	40,5	402,0
22	0,0	37,6	375,0
23	0,0	34,3	353,6
24	0,0	38,3	332,6

Для детального анализа совместной работы АСНЭ и ДГ проанализированы режимы, когда эффективность ДГ изменяется в зависимости от выходной мощности. Стоимость выработки электроэнергии и ее зависимость от срока службы АСНЭ исследованы при двух случаях: – с учетом сокращения срока службы; – без учета сокращения срока службы.

1. Рассмотрим график оптимальной работы без учета сокращения срока службы АСНЭ.

Для оценки стоимости выработки электроэнергии в этом случае используется формула (1). Исходные данные по расходу топлива представлены в таблице 1. На рис. 1 представлены результаты по оптимизации работы ЛЭС. Выработка электроэнергии в каждой секции изменяется в зависимости от КПД.

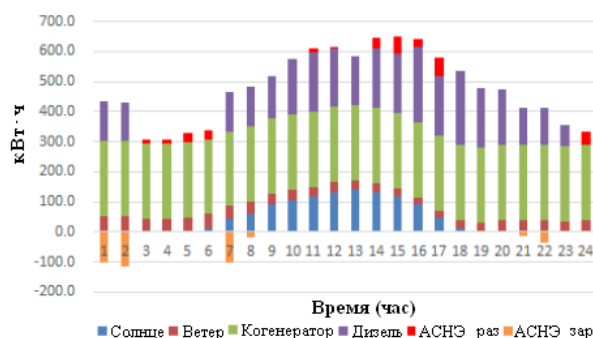


Рисунок 1 - График оптимальной работы ЛЭС без учета сокращения срока службы АСНЭ  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.55.5>

В секциях с 1 по 7 мощность ДГ незначительна, составляет около 10% от номинальной мощности, что соответствует работе ДГ с низким КПД. Поэтому на первой и второй секциях ДГ целесообразно перевести в режим выработки электроэнергии свыше 50% номинальной мощности с более высоким КПД, при этом часть мощности может быть направлена на зарядку АСНЭ. В секциях с 3 по 6 ДГ можно остановить, при этом АСНЭ разряжает заряженную мощность. В 7-й и 8-й секциях ДГ следует перевести в режим выработки мощности на уровне около 50% от номинальной с высоким КПД, в это время АСНЭ заряжает мощность для подготовки к работе в секции с пиковой нагрузкой. В секциях 15, 16 и 17, где возникает нехватка мощности, АСНЭ разряжает заряженную мощность, тем самым решая проблему по обеспечению экономичной работы. На секциях 21 и 22 также используется зарядная мощность АСНЭ вместо снижения мощности ДГ. В секции 24 ДГ, работающий с низким КПД, целесообразно остановить и использовать только заряженную мощность АСНЭ.

2. Рассмотрим график оптимальной работы с учетом сокращения срока службы АСНЭ.

На рис. 2 изображен график оптимальной выработка электроэнергии с учетом сокращения срока службы АСНЭ.

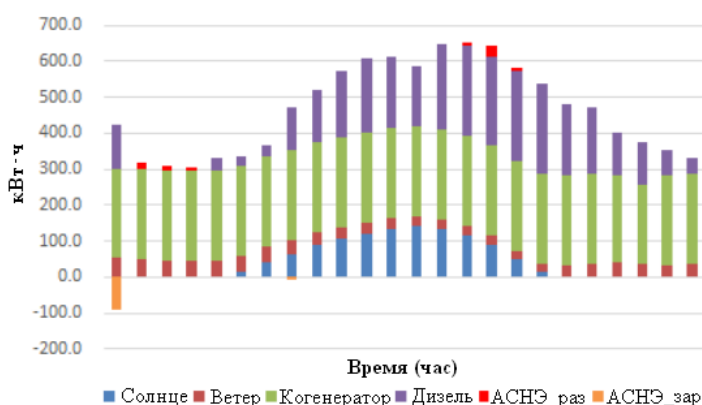


Рисунок 2 - График оптимальной работы ЛЭС с учетом сокращения срока службы АСНЭ  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.55.6>

В том случае, если уровень заряжаемой и разряжаемой энергии АСНЭ увеличивается, необходимо учитывать добавляемую стоимость сокращения срока службы АСНЭ. По сравнению с предыдущим результатом заряжаемая и разряжаемая энергия АСНЭ уменьшаются. В секциях с 1 по 7 мощность ДГ ниже номинальной мощности, но только в секции 1 ДГ вырабатывает электроэнергию на уровне около 50% от номинальной мощности с высоким КПД, а оставшаяся энергия заряжает АСНЭ. В секциях 2-4 ДГ останавливается. В секциях 5-7 мощность ДГ ниже номинальной, но ДГ не может генерировать энергию на более высоком уровне мощности из-за роста затрат в результате сокращения срока службы и эффекта уменьшения количества пусков и остановок ДГ. В секциях 15, 16 и 17, где возникает нехватка мощности, АСНЭ разряжает мощность, заряженную в секции 1, где имеется избыток генерируемой мощности. Вышеприведенная процедура показывает, что АСНЭ регулирует режимы, соответствующие пиковой нагрузке. В отличие от рис. 1, общая энергия заряда и разряда АСНЭ значительно уменьшена на рис. 2, потому что учитывается факт сокращения срока службы АСНЭ.

### Основные результаты и обсуждение

В результате моделирования показано, что эффективность выработки электроэнергии существенно зависит от мощности ДГ и стоимости потерь из-за сокращения срока службы АСНЭ.

Например, общие затраты на выработку электроэнергии в сутки с учетом сокращения срока службы АСНЭ меньше соответствующих затрат без учета срока службы АСНЭ составляют 215 руб. За месяц и год экономия может составлять значительные суммы.

Следует отметить, что эффект от учета сокращения срока службы АСНЭ не проявляется быстро, а накапливается аналогично стоимости амортизации и наблюдается по окончании срока службы. Следовательно, если количество циклов зарядки-разрядки АСНЭ увеличивается, затраты будут увеличиваться, поэтому количество циклов зарядки-разрядки АСНЭ следует уменьшить.

### Заключение

Эффективность выработки электроэнергии в ЛЭС зависит от многих факторов, в том числе от мощности ДГ и затрат, связанных с сокращением срока службы АСНЭ. Комбинированная работа ДГ с АСНЭ, предусматривающая переходы дизель-генератора на режимы с оптимальным КПД, а также учет стоимости запуска и остановки, затрат из-за повышения интенсивности процессов зарядки и разрядки АСНЭ позволяют существенно расширить размер и диапазон экономических выгод. Результаты исследования показывают, что общие затраты на выработку электроэнергии в сутки с учетом сокращения срока службы АСНЭ меньше соответствующих затрат без учета срока службы АСНЭ и составляют несколько сотен рублей. За месяц и год экономия может составлять значительные суммы.

Следует отметить, что эффект от учета сокращения срока службы АСНЭ не проявляется быстро, а накапливается аналогично стоимости амортизации и наблюдается по окончании срока службы. Следовательно, если количество циклов зарядки-разрядки АСНЭ увеличивается, затраты будут увеличиваться, поэтому количество циклов зарядки-разрядки АСНЭ следует уменьшить.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Царегородцев Е.Л., филиал ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, Российская Федерация  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.55.7>

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

Tsaregorodtsev Y.L., branch of the National Research University "MEI" in Smolensk, Smolensk, Russian Federation  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.55.7>

### Список литературы / References

1. Синявский Ю.В. Интеллектуальный алгоритм управления автономными комплексными энергетическими установками арктического исполнения / Ю.В. Синявский, Е.А. Кириллова // Прикладная информатика. – 2021. – № 4. – С. 74–82.
2. Ковалев К.Л. Автономные энергетические системы с кинетическим накопителем энергии / К.Л. Ковалев, В.Н. Полтавец, И.П. Колчанова // Электричество. – 2019. – № 9. – С. 30–40.
3. Стоимость 1кВт энергии от разного топлива. – URL: <http://www.stroypech.ru/aktualnye-voprosy/stoimost-1kvt-energii-gaznogo-topliva.html> (дата обращения: 20.03.2022).
4. Альтернативная энергетика в России. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Альтернативная\\_энергетика\\_в\\_России](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Альтернативная_энергетика_в_России) (дата обращения: 20.03.2022).
5. Дудко К.С. Применение систем накопления энергии на основе аккумуляторных батарей в автономных системах электроснабжения / К.С. Дудко, Д.А. Прасол // Сборник статей Международной научно-технической конференции молодых ученых. – 2020. – С. 4186–4191.
6. Можаяев О.С. Топливная эффективность судовой электростанции / О.С. Можаяев, Е.С. Попов // Вестник астраханского государственного технического университета: Морская техника и технология. – 2014. – № 3. – С. 69–76.
7. Коробко Г.И. Применение в автономных электростанциях дизель-генераторного агрегата с изменяемой частотой вращения / Г.И. Коробко, И.Г. Коробко, М.П. Шилов // Вестник астраханского государственного технического университета: Морская техника и технология. – 2018. – № 4. – С. 42–48.
8. Петров Ю.С. Математические модели электрической системы использования возобновляемых источников энергии для автономного энергоснабжения объектов / Ю.С. Петров, А.К. Музаев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 9. – С. 33–40.
9. Lee H.J. Development of Economic based Optimal Operation Program for Microgrid / H.J. Lee, W.K. Cha, I.K. Song et al. // Journal of KIEE. – 2009. – Vol. 23. – Iss. 12. – P. 106–114.
10. Hua C.C. Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO4 battery / C.C. Hua, Z.W. Syue // International Power Electronics Conference. – ECCE Asia, 2010. – P. 1478–1483. – DOI 10.1109/IPEC.2010.5544506.
11. Ochoa D. Modeling an Isolated hybrid wind-diesel power system for performing frequency control studies. A case of study: San Cristobal Island, Galapagos–Ecuador / D. Ochoa, S. Martinez // IEEE Latin America Transactions. – 2019. – Vol. 17. – Iss. 5. – P. 775–787.
12. Approximate Diesel Fuel Consumption Chart. – URL: <https://www.generatorsource.com/> (accessed: 14.03.2022).
13. Handbook on Battery Energy Storage System. – Asian Development Bank, 2018. – 94 p.
14. Battery Energy Storage Overview [Business & Technology Report Updated April 2019]. – URL: <https://www.cooperative.com/> (accessed: 22.03.2022).

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Sinyavsky Yu. V. Intellektual'nyj algoritm upravleniya avtonomnymi kompleksnymi energeticheskimi ustanovkami arkticheskogo ispolneniya [Intelligent control algorithm for autonomous integrated power plants for arctic regions] / Yu. V. Sinyavsky, E. A. Kirillova // Prikladnaya informatika [Applied Informatics]. – 2021. – № 4. – P. 74–82. [in Russian]

2. Kovalev K. L. Avtonomnye energeticheskie sistemy s kineticheskim nakopitelem energii [Autonomous energy systems with kinetic energy storage] / K.L. Kovalev, V. N. Poltavets, I. P. Kolchanova // *Jelektrichestvo* [Electricity]. – 2019. – № 9. – P. 30–40. [in Russian]
3. Stoimost' 1kVt energii ot raznogo topliva [The cost of 1 kW of energy from different fuels] [Electronic resource] // URL: <http://www.stroypech.ru/aktualnye-voprosy/stoimost-1kvt-energii-raznogo-fuelva.html> (accessed: 20.03.2022). [in Russian]
4. Al'ternativnaya energetika v Rossii [Alternative energy in Russia]. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Article:Alternative\\_energy\\_in\\_Russia](https://www.tadviser.ru/index.php/Article:Alternative_energy_in_Russia) (accessed: 20.03.2022). [in Russian]
5. Dudko K.S. Primenenie sistem nakopleniya energii na osnove akkumulyatornyh batarej v avtonomnyh sistemah elektrosnabzheniya [Application of energy storage systems based on batteries in autonomous power supply systems] / K.S.Dudko, D.A.Prasol // *Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchenyh* [Collection of articles of the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists]. – 2020. – P. 4186-4191. [in Russian]
6. Mozhaev O.S. Toplivnaya effektivnost' sudovoj elektrostancii [Fuel efficiency of a ship power plant] / O.S.Mozhaev, E.S.Popov // *Vestnik astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University: Marine equipment and technology]. – 2014. – № 3. – P. 69–76. [in Russian]
7. Korobko G.I. Primenenie v avtomnyh elektrostanciyah dizel'-generatornogo agregata s izmenyaemoj chastotoj vrashcheniya [Application in autonomous power plants of a diesel-generator set with a variable speed] / G.I. Korobko, I.G. Korobko, M.P. Shilov. – 2018. – № 4. – P. 42–48. [in Russian]
8. Petrov Yu.S. Matematicheskie modeli elektricheskoy sistemy ispol'zovaniya vozobnovlyaemyh istochnikov energii dlya avtomnogo energosnabzheniya ob'ektov [Mathematical models of the electric system for the use of renewable energy sources for autonomous power supply of facilities] / Yu.S. Petrov, A.K. Muzaev // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International Research Journal]. – 2021. – № 9. – P. 33–40. [in Russian]
9. Lee H.J. Development of Economic based Optimal Operation Program for Microgrid / H.J. Lee, W.K. Cha, I.K. Song et al. // *Journal of KIEE*. – 2009. – Vol. 23. – Iss. 12. – P. 106–114.
10. Hua C.C. Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO4 battery / C.C. Hua, Z.W. Syue // *International Power Electronics Conference. – ECCE Asia, 2010.* – P. 1478-1483. – DOI 10.1109/IPEC.2010.5544506.
11. Ochoa D. Modeling an Isolated hybrid wind-diesel power system for performing frequency control studies. A case of study: San Cristobal Island, Galapagos–Ecuador / D. Ochoa, S. Martinez // *IEEE Latin America Transactions*. – 2019. – Vol. 17. – Iss. 5. – P. 775–787.
12. Approximate Diesel Fuel Consumption Chart. – URL: <https://www.generatorsource.com/> (accessed: 14.03.2022).
13. Handbook on Battery Energy Storage System. – Asian Development Bank, 2018. – 94 p.
14. Battery Energy Storage Overview [Business & Technology Report Updated April 2019]. – URL: <https://www.cooperative.com/> (accessed: 22.03.2022).