

УДК 621.355:004.94

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ И
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ДОМОХОЗЯЙСТВА
ENERGY SAVING AND REDISTRIBUTION SYSTEM FOR HOUSEHOLD
PARAMETERS DESIGN**

И.В. Кулинич

Научный руководитель – К.В. Доброго, д.ф.-м.н.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

I. Kulinich

Supervisor – K. Dobrego, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Belarusian National Technical University, Minsk

Аннотация: *Описывается система накопления и распределения электроэнергии с функциями потребительского тарифного маневрирования, буферизации ветрогенерации, бесперебойного электроснабжения и выравнивания нагрузки сети. Приводится качественный анализ определения оптимальной емкости СНЭ обеспечивающей выполнение перечисленных функций. Показано, что повышение емкости СНЭ выше определенной части суточного дефицита электроэнергии (при отсутствии возможности продажи по высоким тарифам) снижает экономическую эффективность его применения. Приведены формулы для оценки экономического эффекта применения СНЭ.*

Abstract: *A system for the accumulation and distribution of electricity with the functions of consumer tariff maneuvering, buffering of wind generation and uninterrupted power supply and network load balancing is described. A qualitative analysis is provided to determine the optimal capacity of the solar energy system that ensures the performance of the listed functions. It is shown that increasing the capacity of ESS above a certain part of the daily electricity shortage (in the absence of the possibility of sale at high tariffs) reduces the economic efficiency of its use. Formulas are given for assessing the economic effect of using ESS.*

Ключевые слова: *система накопления электроэнергии, аккумуляторная батарея, локальная энергетическая система, интеллектуальная сеть, возобновляемые источники энергии.*

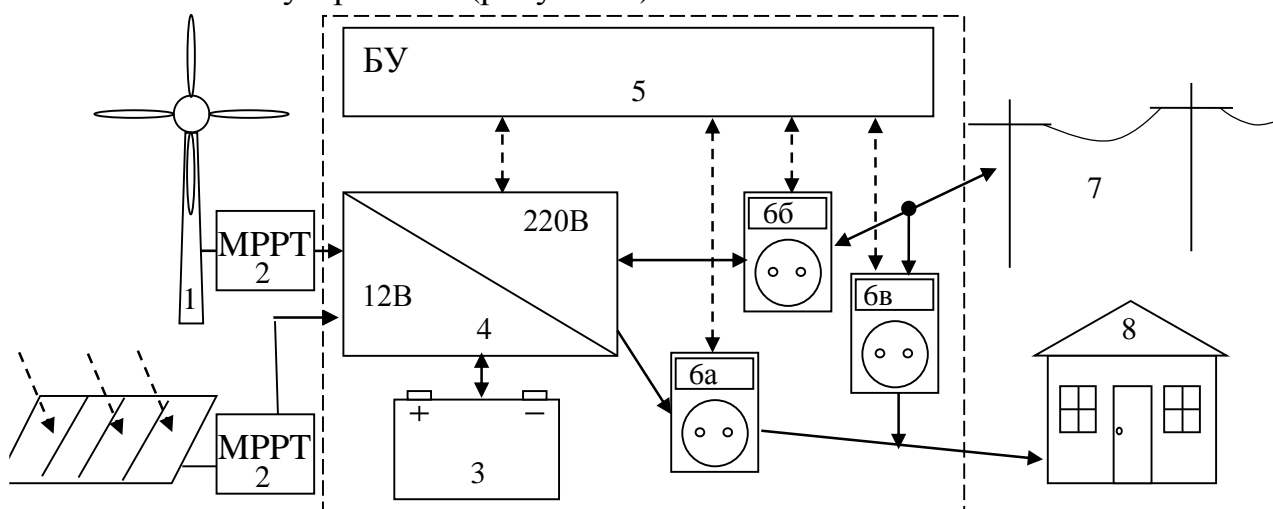
Keywords: *energy storage system, local energy system, battery, intellectual network, renewable energy sources*

Введение

Основополагающим принципом работы энергетической системы является баланс между генерацией и потреблением. Балансировка распределительной сети традиционно достигается за счет увеличения генерации для удовлетворения потребностей в энергии. Но этот подход отрицательно сказывается как на эффективности, так и на сроке эксплуатации оборудования. Системы накопления электроэнергии (СНЭ) делают электрическую энергию запасаемой и портативной, снимая необходимость строгой одновременности процессов ее генерации и потребления. Актуальность СНЭ выросла в последние десятилетия,

в связи с увеличением доля возобновляемых источников энергии в энергетическом балансе, развитием атомной энергетики.

Включение в систему «генератор – потребитель» звена «накопитель» позволяет достигать ряда технических и экономических результатов. Обеспечение надежности и бесперебойности электроснабжения, для метеозависимой генерации – выполнение графика поставки электроэнергии, обеспечение потребления электроэнергии по минимальным (дифференцированным по времени) тарифам, оптимизация (выравнивание графика нагрузки) режима работы генерирующих станций и энергосистемы в целом, повышение качества электричества. Система накопления электроэнергии (СНЭ) – не просто аккумулятор, периодически накапливающий и отдающий энергию, а система, осуществляющая функции «умного» распределения потоков электроэнергии внутри себя и системы «генератор-накопитель-потребитель». СНЭ включает в себя: электрохимический накопитель энергии (аккумуляторную батарею), одно- или двунаправленный преобразователь электрической энергии (инвертор), блок управления, блоки коммутации, иные сенсорные или исполнительные устройства (рисунок 1).



1 – ветрогенератор (альтернативный источник 12В); 2 – МРРТ контроллер,
3 – аккумуляторная батарея 12В; 4 – инвертор-выпрямитель; 5 – блок управления;
6а, 6б, 6в – управляемые реле (коммутаторы); 7 – стационарная сеть; 8 – потребительская сеть.

Рисунок 1 – Схема «домашней» СНЭ

Условно можно разделить СНЭ по емкости и мощности на устройства «домашнего» (~ 10 кВт.ч), промышленного (~ 100 кВт.ч) и системного (~ МВт.ч) уровня, различающиеся по масштабу, стандартам проектирования и исполнения.

Режимы работы СНЭ.

Режим работы «источник бесперебойного питания» (ИБП) является простым режимом работы СНЭ, реализуемым при помощи АКБ, двунаправленного инвертора, коммутатора и блока управления, осуществляющего контроль за тем чтобы:

- напряжения и токи находились в допустимых пределах;
- цепь потребителя перекоммутировалась на инвертер при отключении питания стационарной сети.

Режим работы «потребительское тарифное маневрирование» (ПТМ) направлен на то, чтобы накапливать электроэнергию во время действия наиболее дешевых тарифов на электроэнергию и отдавать ее во время действия наиболее дорогих тарифов.

Режим ТМ реализуется при помощи АКБ, двунаправленного инвертора (инвертор–выпрямитель), таймеров–коммутаторов. Блок управления осуществляет контроль за тем чтобы: 1) напряжения и токи находились в допустимых пределах; 2) управляет таймерами–коммутаторами (если они не работают по самостоятельным программам); 3) переключает нагрузку на стационарную сеть при разрядке АКБ. Таймер–коммутатор “б” включает зарядку АКБ от постоянной сети в период времени дешевых тарифов (коммутатор “а” разъединен), при этом зарядный ток должен соответствовать длительности периода низких тарифов. В период времени дорогого тарифа (пик нагрузки) таймер–коммутатор “а” подключает АКБ через инвертор к нагрузке, таймер–коммутатор “б” разрывает линию сеть – инвертор. Коммутатор “в” работает в управляемом режиме.

Как правило, функции ИБП и ПТМ объединяются. Это реализуется соответствующим усложнением алгоритма работы блока управления и коммутирующих устройств. Во время дешевого тарифа АКБ заряжается полностью, во время дорогого тарифа (пиков потребления) БУ допускает максимальную разрядку АКБ и затем подключает стационарную сеть. В прочее время АКБ заряжается частично и выполняет функции ИБП.

При подключении к системе одного или нескольких источников генерации к функциям СНЭ добавляется буферизация генерируемой энергии. Для небольших «домашних» энергетических систем такими источниками, как правило, являются солнечные панели и (или) ветрогенератор. Алгоритмы управления системой в целом могут быть сложными, нацеленными на оптимизацию работы системы (целевой функции). Данный режим работы назовем режимом накопления–распределения электрической энергии» (НРЭ).

СНЭ может объединять все упомянутые выше режимы работы и функции. Экономическая эффективность применения СНЭ возрастает при выполнении ею максимально возможного количества полезных функций. Ввиду этого обстоятельства некоторые компании, развивающие направление СНЭ в энергетике, вводят понятие «энергетический роутер», которое подразумевает систему, позволяющую «смешивать» энергию из различных несинхронизированных источников и добавлять к ним мощность от накопителя, а также балансировать нагрузки между фазами и компенсировать реактивную мощность. При этом СНЭ становится ядром интеллектуальной локальной микросети. Крупные накопители участвуют в управлении качеством сетевой электроэнергии.

Расчет емкости АКБ на основе предписанных функций системы.

Для оценки параметров СНЭ должно быть сформулировано общее предписание работы СНЭ. В качестве примера сформулируем следующее предписание:

- Энергия ветрогенерации должна накапливаться или непосредственно использоваться потребителями (не сбрасываться);
- Не менее $E_{\text{пик}}$ энергии СНЭ должно выдаваться в течение периода пиковых цен;
- После выдачи энергии в пик СНЭ должно сохранять E_{res} энергии для осуществления функции БП;
- За время ночного минимума потребления (~6.5 часов) СНЭ должно заряжаться до уровня $C - E_{\text{res}}$.

Конкретизация параметров предписания в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры СНЭ для упрощенного моделирования

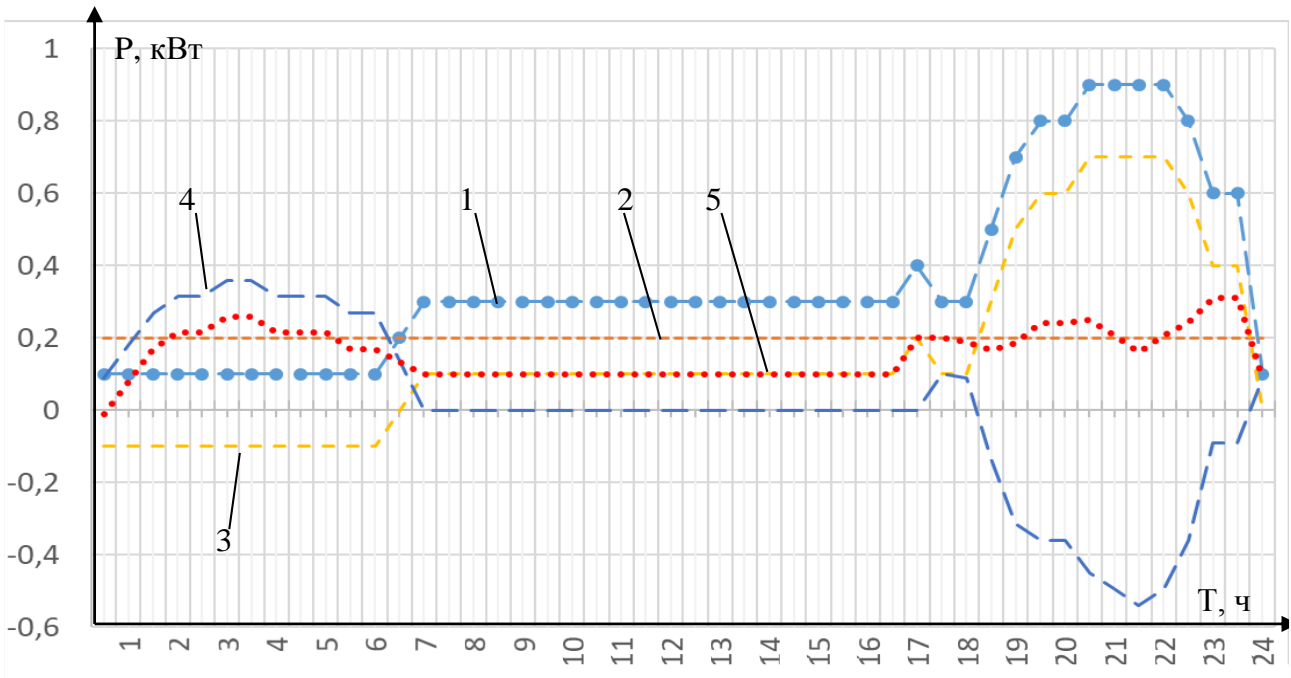
Обозначение	Характеристика	Ед. изм.	Значение
$E_{\text{потр}}$	Среднесуточное потребление дома	кВт.ч	8.45
$P_{\text{потр}}$	Мощность потребления дома	кВт	Модельный график
$P_{\text{пик}}$	Уровень пикового потребления	кВт	0,9
$\langle P_{\text{пик}} \rangle$	Уровень мощности за период пиковых цен	кВт	0,73
$E_{\text{вг}}$	Средняя суточная ветрогенерация	кВт.ч	4,8
$P_{\text{вг}}$	Мощность ветрогенерации	кВт	0,2
Тп1 -Тп2	Период пиковых цен	час	18.00-23.30
Тнм1-Тнм2	Период ночного минимума цен	час	0.00–6.30
$P_{\text{СНЭ}}$	Мощность нагрузки СНЭ (с учетом знака)	кВт	Согласно алгоритму управления
C	Емкость СНЭ	кВт.ч	1,9
ξ	Емкость СНЭ относительно среднего дефицита энергии $\xi = C / \langle (E_{\text{потр}} - E_{\text{вг}}) \rangle$	Безр.	0,52
$E_{\text{рез}}$	Резервная емкость, (часть от C)	кВт.ч	0,2

Оценочное моделирование работы СНЭ.

Оценочное моделирование может быть проведено с использованием эффективных или осредненных режимов системы «генератор-накопитель-потребитель» с учетом предписания работы. Также могут быть рассмотрены статистические варианты рабочих параметров и на этой основе определен разброс технико-экономических параметров СНЭ.

Проведем качественное моделирование работы СНЭ в локальной энергетической системе жилого дома. Пусть мощность ветрогенерации – постоянна, график потребления дома – упрощенная кусочно – линейная функция (графики 1 и 2, рисунок 2).

Исходя из общего предписания работы СНЭ и параметров Табл.1 полагаем, что после разрядки резервная остаточная емкость СНЭ 0.2кВт.ч. С 00.00 часов до 6.30 идет зарядка СНЭ средней мощностью 0,26 кВт (0.2 кВт за счет ветрогенератора) и стационарной сети. С 6.30 часов по 18.00 СНЭ работает на буферизацию ветрогенерации, при этом емкость, зарезервированная для буферизации ветрогенерации, не превышает средней мощности ветрогенерации



1 – нагрузка потребления, 2 – усредненная ветрогенерация, 3 – дефицит ЭЭ (потребление - генерация), 4 – мощность накопления, 5 – общая нагрузка сети.

Рисунок 2 – Модельные графики нагрузки в системе «сеть-генератор-накопитель-потребитель». Относительная емкость СНЭ $\xi=0,52$

умноженной на время флуктуации скорости ветра. Таким образом в суточной работе СНЭ выделяются 4 характерных области и режима работы. 1 – запасание энергии в ночной период, 2 – квазистационарная буферизация генерации и потребления, 3 – добор энергии перед периодом дорогой электроэнергии, 4 – отдача электроэнергии в пик потребления. Специфика генерации и потребления накладывает требования к функционированию СНЭ в каждой из указанных областей.

Рабочий график состояния зарядки может иметь вид (рисунок 3).

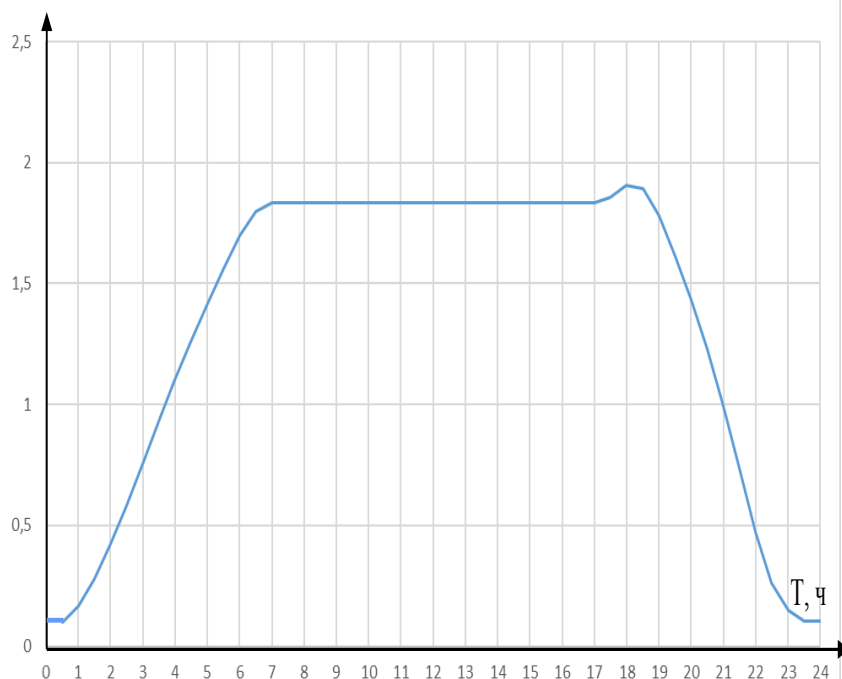


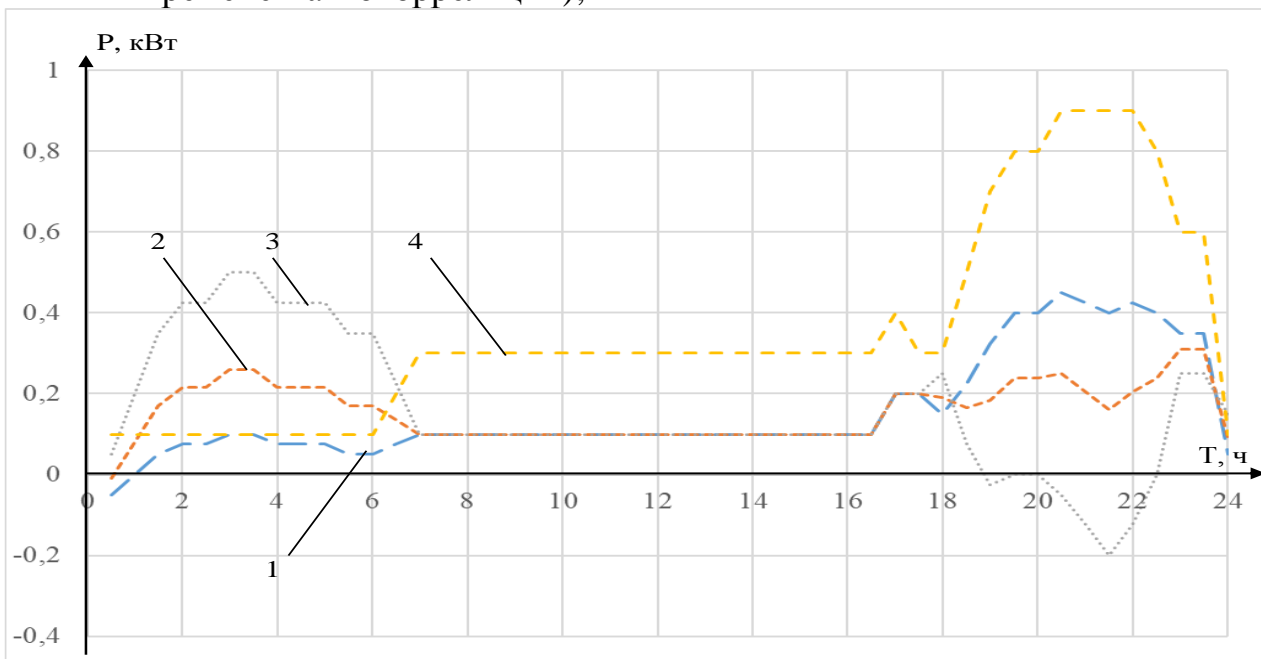
Рисунок 3 – Модельный график состояния зарядки СНЭ для оценочного моделирования

Согласно общему предписанию работы СНЭ основная емкость ($C-C_{рез}$) разгружается в течение часов пикового потребления. В этом случае средняя мощность нагрузки составляет $(C-C_{рез})/5,5=0,33\text{кВт}$ (5,5ч. - длительность периода пиковых цен), что выше средней мощности потребления домохозяйства. Следует рассмотреть вариант когда нет возможности поставки электроэнергии в сеть по выгодному тарифу. Емкость накопителя должна соответствовать ожидаемой нагрузке $(\langle P_{пик} \rangle - P_{вт} - \langle P_{сеть} \rangle) \cdot (T_{п2} - T_{п1}) = C - C_{рез}$. Учитывая построенные графики работы ветрогенератора, СНЭ и нагрузки потребления, как разность соответствующих величин, строим график нагрузки стационарной сети. (график 4, рисунок 2).

Аналогичные модельные графики нагрузки стационарной сети построены для относительной емкости СНЭ $\xi=0,33$ и $\xi=0,88$ и отсутствии возможности возврата излишней энергии в сеть (рисунок 4). Из рисунка 4 видно, что экономический эффект СНЭ, связанный с потребителем тарифным маневрированием растет с ростом емкости СНЭ до определенного уровня. Дальнейшее увеличение емкости СНЭ не влияет на функцию потребителя тарифного маневрирования, хотя может улучшить функции буферизации ветрогенерации и обеспечения бесперебойности электроснабжения.

Повышение точности(адекватности) модели работы СНЭ связано с учетом ряда факторов:

- Сложный график реального потребления электроэнергии;
- Особенности используемых АКБ;
- Статистический характер ветрогенерации и потребления. (графики нагрузки должны рассматриваться как статистические в рамках модели Вейбула или нормальной случайной величины с характерной дисперсией и временем автокорреляции);



1 – $\xi=0,33$; 2 – $\xi=0,52$; 3 – $\xi=0,88$, 4 – без накопителя ЭЭ.

Рисунок 4 – Модельные графики нагрузки стационарной сети в системе «сеть- генератор- накопитель- потребитель» при различных емкостях СНЭ

- Сезонная и недельная вариабельность ветрогенерации и нагрузки;
- Специфика нагрузки (наличие быстрых пиков, превышение допустимых мощностей и токов 10С).

Рассмотрим возможность учета данных факторов. Усредненный графикреального потребления электроэнергии может быть обработан в рамках описанной процедуры. Особенности используемых АКБ определяют технически рациональный уровень разрядки и Срез, а также допустимый токовый режим разрядки и зарядки и также учитываются в рамках рассмотренной процедуры моделирования.

Учет статистического характера ветрогенерации и потребления требует усложнения подходов к моделированию (методики моделирования). Представим мощность ветрогенерации и потребления дискретными статистическими функциями со следующими характеристиками.

Таблица 2 – Статистические характеристики

	Мат ожидание	Дисперсия	Характерное время изменчивости
$P_{вг}$	$M(P_{вг},t_i)$	$D(P_{вг},t_i)$	$\tau_1(P_{вг})$
$P_{потр}$	$M(P_{потр},t_i)$	$D(P_{потр},t_i)$	$\tau_1(P_{потр})$

Для нормальных случайных величин действуют простые правила сложения:

$$M(P_{вг} + P_{потр},t_i) = M(P_{вг},t_i) + M(P_{потр},t_i), \quad D(P_{вг} + P_{потр},t_i) = D(P_{вг},t_i) + D(P_{потр},t_i), \quad (1)$$

Следуя методике можно построить ожидаемую величину и дисперсию графика нагрузки сети. При этом режим работы СНЭ может быть настроен либо по среднестатистическому графику генерации и потребления, либо уточнен с учетом статистических отклонений. Алгоритм управления СНЭ может иметь прогностический (интеллектуальный) характер, позволяющий компенсировать статистические отклонения графика потребления.

Оценка экономической целесообразности СНЭ в системе «сеть- генератор- накопитель- потребитель».

Основным показателем экономической эффективности применения СНЭ является срок окупаемости инвестиций по созданию СНЭ. Общая сумма инвестиций может быть оценена как удвоенная стоимость аккумуляторов необходимой энергетической емкости. Экономический эффект от использования СНЭ удобно оценивать отдельно по каждой исполняемой функции, таблица 3.

Таблица 3 – Оценка экономического эффекта СНЭ по функциям.

Функция	Метод расчета экономического эффекта
Функция потребительского тарифного маневрирования.	$V_{ПТМ} = \int_0^T P_{СНЭ}(t) C_{ТЭЭ}(t) dt,$ где $C_{ТЭЭ}(t)$ – стоимость электроэнергии по дифференцированному по времени тарифу. Мощность на разрядку считается положительной.
Функция буферизации ветрогенерации.	$V_{БВГ} = \int_0^T (P_{ВГ}(t) - P_{ПОТР}(t)) C_{ТЭЭ}(t) dt,$ Определяется стоимостью профицита электроэнергии за контрольный период.

Функция ИБП (аварийного питания)	$V_{ИБП} = Вер_{АО} C_{ТАО},$ <p>где $Вер_{АО}$– вероятность аварийного отключения электроэнергии за контрольный период (год), $C_{ТАО}$ –среднестатистическая стоимость ликвидации последствий аварийного отключения электроэнергии.</p>
--	---

Система накопитель- распределитель электроэнергии для домашнего применения может быть построена на базе имеющихся в продаже контроллеров заряда – инверторов, а также источников бесперебойного питания.

Заключение

В докладе рассмотрены функции, структура СНЭ в системе «сеть-генератор- накопитель- потребитель» а также простые подходы для выбора параметров применительно к домохозяйству.

Показано, что повышение емкости СНЭ выше определенной части суточного дефицита электроэнергии (при отсутствии возможности продажи по высоким тарифам) снижает экономическую эффективность его применения.

Приведены формулы для оценки экономического эффекта применения СНЭ с функциями потребительского тарифного маневрирования, буферизации ветрогенерации и аварийного питания (ИБП).

Литература

1. Национальная ассоциация нефтегазового сервиса [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nangs.org/news/renewables/eksperty-mirovoyo-rynok-nakopiteley-energii-do-2030-goda-budet-rasti-na-23-v-god>. Дата доступа: 20.10.2023
2. Доброго К.В. Об обосновании экономической целесообразности использования электрохимических накопителей электроэнергии в энергетической системе. Энергетическая стратегия, №5 (89), 2022, с.28-32