

УДК 621.355

**ОБЗОРНАЯ ЛЕКЦИЯ. СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ПОДКЛЮЧАЕМЫЕ
К ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ: КЛАССЫ,
ФУНКЦИИ, ЗАДАЧИ, АРХИТЕКТУРЫ И ПАРАМЕТРЫ**

Андрианова Людмила Прокопьевна

д-р техн. наук, профессор

Павлова Зухра Хасановна

д-р техн. наук, профессор

Рябишина Лилия Амировна

канд. техн. наук, доцент

Хакимьянов Марат Ильгизович

д-р техн. наук, профессор

Хазиева Регина Тагировна

канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО Уфимский государственный
нефтяной технический университет

Аннотация. Представлена информация для систем накопления электрической энергии (СНЭЭ), взаимодействующих с энергосистемой. Приведены в табличном виде функции и типичные задачи классов СНЭЭ, а также типовые архитектуры с одним и двумя стыковочными выводами. Приведены параметры и характеристики СНЭЭ, методические рекомендации по их определению для дальнейшего использования при проектировании и испытаниях СНЭЭ.

Ключевые слова: системы накопления электрической энергии, классы и функции систем накопления, типовая архитектура, основная и вспомогательная подсистемы, точка подключения, параметры и характеристики.

OVERVIEW LECTURE. ELECTRIC POWER STORAGE SYSTEMS CONNECTED TO THE ELECTRIC POWER SYSTEM: CLASSES, FUNCTIONS, TASKS, ARCHITECTURES, AND PARAMETERS

Andrianova Lyudmila Prokofievna
Pavlova Zuhra Khasanovna
Ryabishina Liliya Amirovna
Khakimjanov Marat Ilgizovich
Khazieva Regina Tagirovna

Abstract. Information is provided for electric energy storage systems (SNEE) that interact with the power system. The functions and typical tasks of the SNEE classes, as well as typical architectures with one and two connecting pins, are presented in tabular form. The parameters and characteristics of SNEE, methodological recommendations for their determination for further use in the design and testing of SNEE are given.

Keywords: electrical energy storage systems, classes and functions of storage systems, typical architecture, main and auxiliary subsystems, connection point, parameters and characteristics.

В обзорной лекции рассматриваются системы накопления электрической энергии (СНЭЭ), предназначенные для работы в составе энергосистемы России и технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем (рис. 1) [1]. Для таких СНЭЭ устанавливается согласно ГОСТ Р 58092.2.1 [2, 3] перечень основных параметров, влияющих на выходные характеристики СНЭЭ.

В электрической системе (рис. 1) СНЭ выполняет следующие функции:

- режим источника бесперебойного питания; обеспечение устойчивости при сбросах/набросах нагрузки; стабилизация работы генераторного оборудования;
- обеспечение горячего резерва мощности; поддержание качества электроэнергии.

Граница между СНЭЭ и энергосистемой определяется в точке подключения (ТПН) согласно ГОСТ 58092.2.1 [3].

В зависимости от выполняемых функций и использования СНЭЭ подразделяются на три класса (таблица 1) [3, 4].

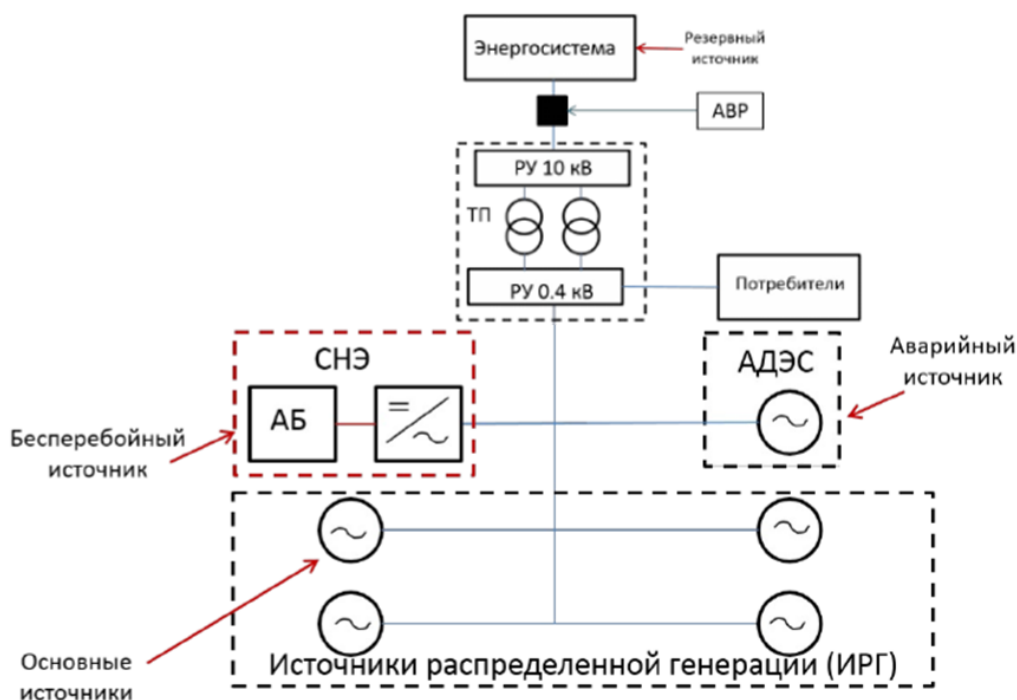


Рис. 1. Структура электрической системы с СНЭЭ:

АВР – автоматическое включение резерва; **РУ** – распределительное устройство (РУ10 кВ, РУ 0,4 кВ); **ТП** – трансформаторная подстанция; **АБ** – аккумуляторная батарея; **СНЭ** – система накопления энергии; **АДЭС** – аварийная дизельная электростанция [1]:

Типовые архитектуры СНЭЭ:

- архитектура с одним стыковочным выводом, с одной ТПН (рис. 2);



Рис. 2. Типовая архитектура СНЭЭ [3, с. 10]

- архитектура с двумя стыковочными выводами, с основной и вспомогательной ТПН (рис. 3).

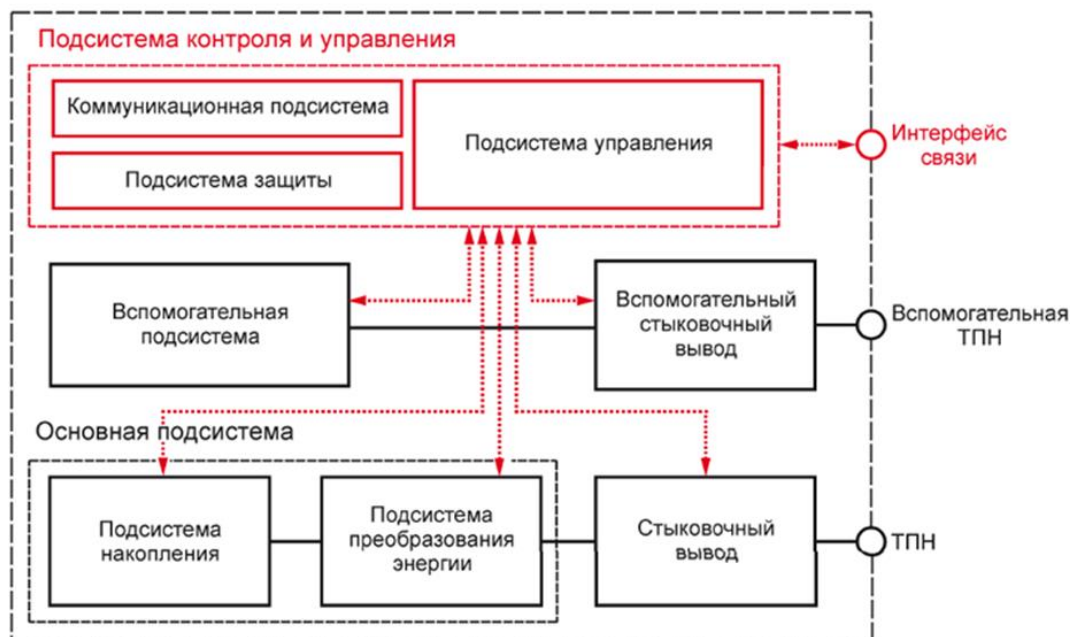


Рис. 3. Типовая архитектура СНЭЭ с вспомогательной ТПН [3, с.11]

Таблица 1

Классы СНЭЭ

Класс	Характеристика
класс А	СНЭЭ обеспечивает поглощение или отдачу требуемой мощности в течение непродолжительного рабочего цикла, например, заряд и разряд СНЭЭ менее чем за 1 ч
класс В	СНЭЭ обеспечивает поглощение или отдачу требуемой мощности в течение длительного рабочего цикла, например, заряд и разряд СНЭЭ более чем за 1 ч
класс С	СНЭЭ обеспечивает отдачу электрической мощности переменного тока в энергосистему во время аварийного режима при отсутствии внешнего источника питания.

Одна и та же СНЭЭ может использоваться в комбинации приложений разных классов [3].

Типичные задачи для указанных классов СНЭЭ приведены в таблице 2 [3].

Таблица 2

Классификация задач СНЭЭ

Классы	Типичные задачи (приложения)
Класс А	1. Регулирование частоты сети: СНЭЭ участвует в регулировании частоты электрического тока в энергосистеме при помощи отдачи и/или поглощения активной мощности.
	2. Компенсация колебаний мощности: СНЭЭ стабилизирует колебания генерируемой мощности и мощности нагрузки.
	3. Регулирование напряжения в узлах: СНЭЭ обеспечивает регулирование напряжения в узлах энергосистемы посредством изменения реактивной и активной мощностей.
	4. Смягчение последствий снижения качества питания: СНЭЭ смягчает наведенные помехи в энергосистеме, такие как кратковременные прерывания, провалы напряжения, выбросы напряжения, гармоники напряжения и тока, переходные перенапряжения, быстрые изменения напряжения, при помощи реактивной или активной мощности.
	5. Компенсация реактивной мощности: СНЭЭ участвует в регулировании реактивной мощности в определенной области регулирования энергосистемы.
Класс В	Срезание или смещение пиков нагрузок: СНЭЭ отдает накопленную энергию в период пикового потребления мощности нагрузкой или поглощает избыток вырабатываемой источниками энергии. СНЭЭ, выполняющая эту задачу, способствует повышению эффективности <i>электрических станций и</i> электрических сетей.
Класс С	Бесперебойное питание: СНЭЭ отдает в электрическую сеть, технологически не связанную с Единой энергетической системой России и изолированными территориальными электроэнергетическими системами или выделенную на изолированную работу часть этих систем, мощность переменного тока, необходимую для работы ответственных систем в течение требуемого периода времени, в соответствии с технической спецификацией на систему. Таким образом, применение СНЭЭ может снизить риск массовых отключений.

Перечень параметров СНЭЭ представлен в таблице 3.

Таблица 3

Параметры СНЭЭ [3, 4]

Наименование параметра	Краткая характеристика
1. Номинальная энергоемкость, Вт·ч	Номинальная энергоемкость – энергия, которую СНЭЭ может отдать в ТПН в условиях проведения испытаний.
2. Входная и выходная мощности, Вт, вар, В·А	Мощности, которые СНЭЭ может поглощать или отдавать в течение определенного времени в ТПН в условиях эксплуатации
3. Эффективность заряда-разряда, %	Эффективность заряда-разряда СНЭЭ – это отношение полной выходной энергии к полной входной энергии в течение одного цикла заряда-разряда системы при нормированных входной и выходной мощностях
4. Расчетный срок службы (годы, рабочие циклы)	Расчетный срок службы СНЭЭ – момент времени, в который происходит ухудшение любого из параметров: фактической энергоемкости, входной и выходной мощности, отклика системы до уровней, установленных в технических условиях конкретной СНЭЭ в качестве значения показателей в конце срока службы
5. Отклик системы: - время отклика на единичное ступенчатое возмущение, с; - скорость изменения выходной переменной, Вт/с);	Типовой уставкой для определения времени отклика на единичное ступенчатое возмущение является значение нормированной входной или выходной мощности.
6. Мощность потребления вспомогательной подсистемы, Вт	Мощность потребления вспомогательной подсистемы СНЭЭ – это мощность, необходимая для работы вспомогательной подсистемы
7. Саморазряд, Вт·ч/ч	Саморазряд СНЭЭ – это потери энергии системы в остановленном состоянии за стандартный период времени.
8. Нормированный диапазон напряжений, В	Нормированный диапазон напряжений СНЭЭ – это диапазон значений напряжения в ТПН, в котором система должна оставаться подключенной к сети.
9. Нормированный диапазон частот, Гц	Нормированный диапазон частот СНЭЭ – диапазон значений частоты в ТПН, в котором система должна оставаться подключенной к сети.

Все параметры, указанные в таблице 3, согласно ГОСТ [3, 4] измеряют или рассчитывают в точке подключения ТПН. Для определения параметров СНЭЭ даны методические рекомендации, приведенные в соответствии с [3, 4].

Номинальная энергоемкость ($E_{ном}$). Энергоемкость оценивают с учетом потерь энергии, включая потери на преобразование и затраты энергии, используемой вспомогательной подсистемой, и определяют как произведение нормированной выходной мощности ($P_{ном.}$) на длительность времени отдачи ($T_{отд.}$) данной нормированной мощности.

$$E_{ном} = P_{ном.} \cdot T_{отд.}$$

Входная и выходная мощности. Значения нормированной входной и выходной мощностей указывают вместе с длительностью поглощения или отдачи мощности. Входная и выходная мощности могут быть активными (P), реактивными (Q) и полными (S) мощностями.

Нормированная активная входная мощность СНЭЭ – это максимальная постоянная мощность в ТПН, которая может быть поглощена системой в течение определенного периода времени, начиная с минимальной степени заряженности (СЗ). Направление потока активной входной мощности принимают отрицательным, как показано на **рис. 4** [2, с. 12].

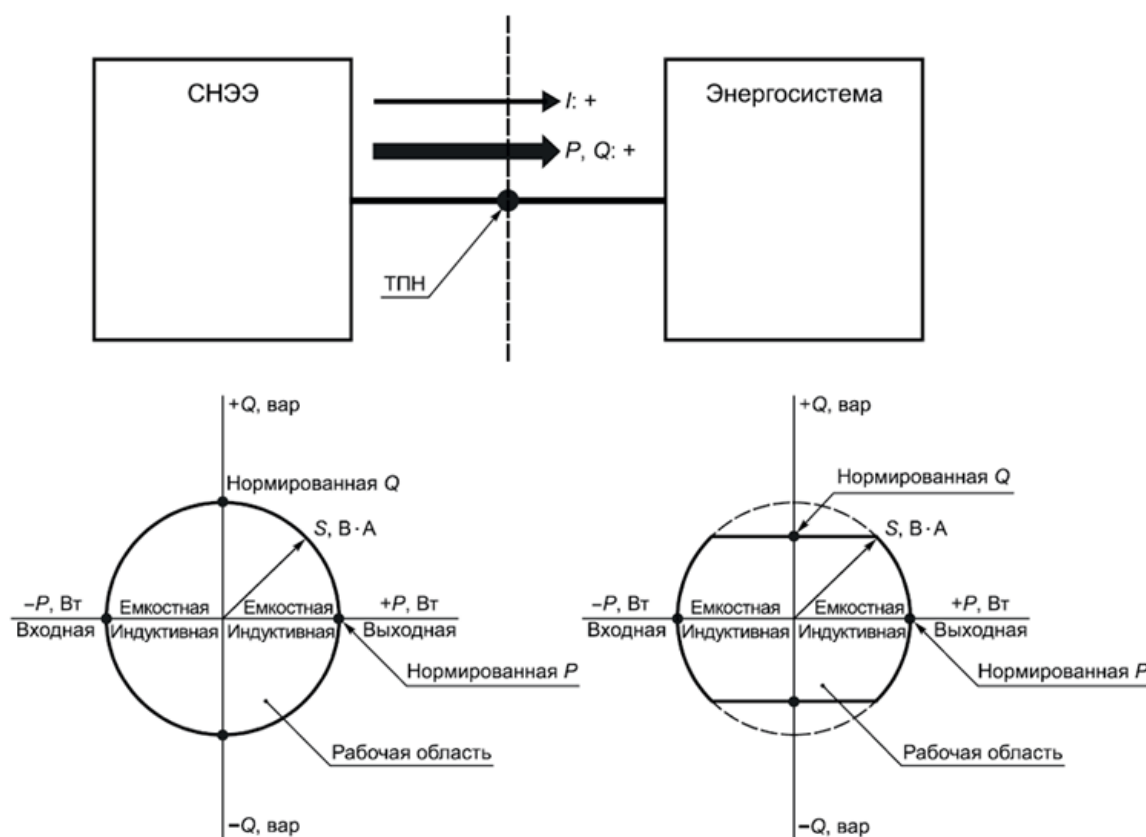


Рис. 4. Правило определения направления потоков активной и реактивной мощностей [2, с. 12]

Диаграммы активной и реактивной мощностей приведены для случаев равенства входной и выходной мощностей.

Нормированная активная выходная мощность СНЭЭ – это максимальная постоянная мощность в ТПН, которая может быть отдана системой в течение определенного периода времени, начиная с полностью заряженного состояния. Направление потока активной выходной мощности принимают положительным, как показано на **рис. 4**. В зависимости от вида задач СНЭЭ, указанных в **таблице 2**, задают разные диаграммы мощностей и определяют показатели входной и выходной мощностей, а также время, в течение которого СНЭЭ должна быть способна поглощать или отдавать постоянную мощность. Нормированная реактивная мощность СНЭЭ – это максимальная постоянная реактивная мощность в ТПН, которая может быть непрерывно отдана или поглощена системой. Направление потока реактивной мощности определяют, как показано на **рис. 4**.

Полная мощность СНЭЭ – это векторная сумма активной и реактивной мощностей системы в ТПН (**рис. 4**).

Эффективность заряда-разряда. Эффективность заряда-разряда следует вычислять как энергоэффективность в цикле заряда от полностью разряженного состояния до полностью заряженного, с последующим разрядом до полностью разряженного состояния. Эффективность заряда-разряда зависит от фактической энергоемкости, нормированных активных входной и выходной мощностей, мощности потребления вспомогательной подсистемы, а также от условий проведения испытаний.

Для СНЭЭ с архитектурой (**рис. 2**), эффективность заряда-разряда η_{rt} рассчитывают по формуле [3, с. 13]

$$\eta_{rt} = \frac{E_o}{E_I} . \quad (1)$$

Для СНЭЭ с архитектурой (**рис. 3**), эффективность заряда-разряда η_{rt} рассчитывают по формуле [3, с. 13]

$$\eta_{rt} = \frac{E_o - E_{aux_o}}{E_I + E_{aux_I}} , \quad (2)$$

где E_o - полная выходная энергия, измеренная в основной ТПН, с учетом потерь энергии, включая потери на преобразование и потери энергии, используемой вспомогательной подсистемой;

E_I - полная входная энергия, измеренная в основной ТПН;

E_{aux_o} - потребление энергии вспомогательной подсистемой, измеренное во вспомогательной ТПН во время отдачи энергии;

E_{aux_I} - потребление энергии вспомогательной подсистемой, измеренное во вспомогательной ТПН во время поглощения энергии, как показано на рис.3.

Расчетный срок службы. Для вычисления расчетного срока службы СНЭЭ в качестве важнейших рабочих характеристик рассматривают характеристики ухудшения параметров вследствие старения или циклов заряда и разряда (рис. 5).

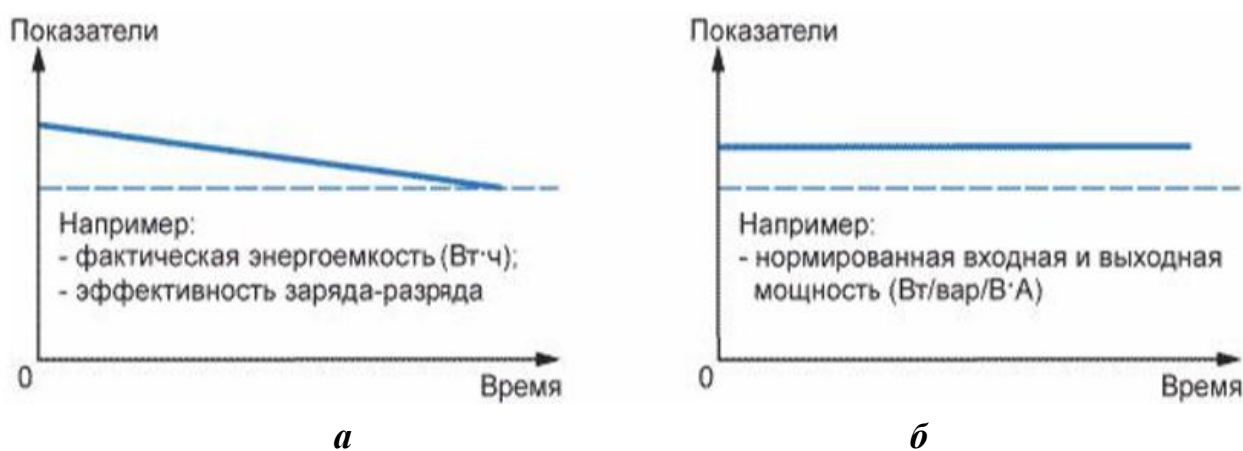


Рис. 5. Изменение рабочих параметров СНЭЭ с течением времени:
а — фактической энергоемкости и эффективности заряда-разряда;
б —нормированной входной и выходной мощности [4, с.17]

Для обеспечения требуемого срока службы СНЭЭ при расчете начальной фактической энергоемкости на стадии проектирования необходимо учитывать снижение энергоемкости в зависимости от вида задачи и условий эксплуатации.

Ухудшение рабочих параметров СНЭЭ обычно происходит вследствие старения или выполнения циклов заряда-разряда, а также из-за некоторых типов повреждений. Влияние обычных факторов, которые должны быть учтены при расчете срока службы СНЭЭ, показано на рис. 6.

При определении расчетного срока службы СНЭЭ необходимо учитывать как ухудшение рабочих характеристик, так и план технического обслуживания, согласованный между заказчиком и изготовителем (поставщиком) СНЭЭ [3, 4].

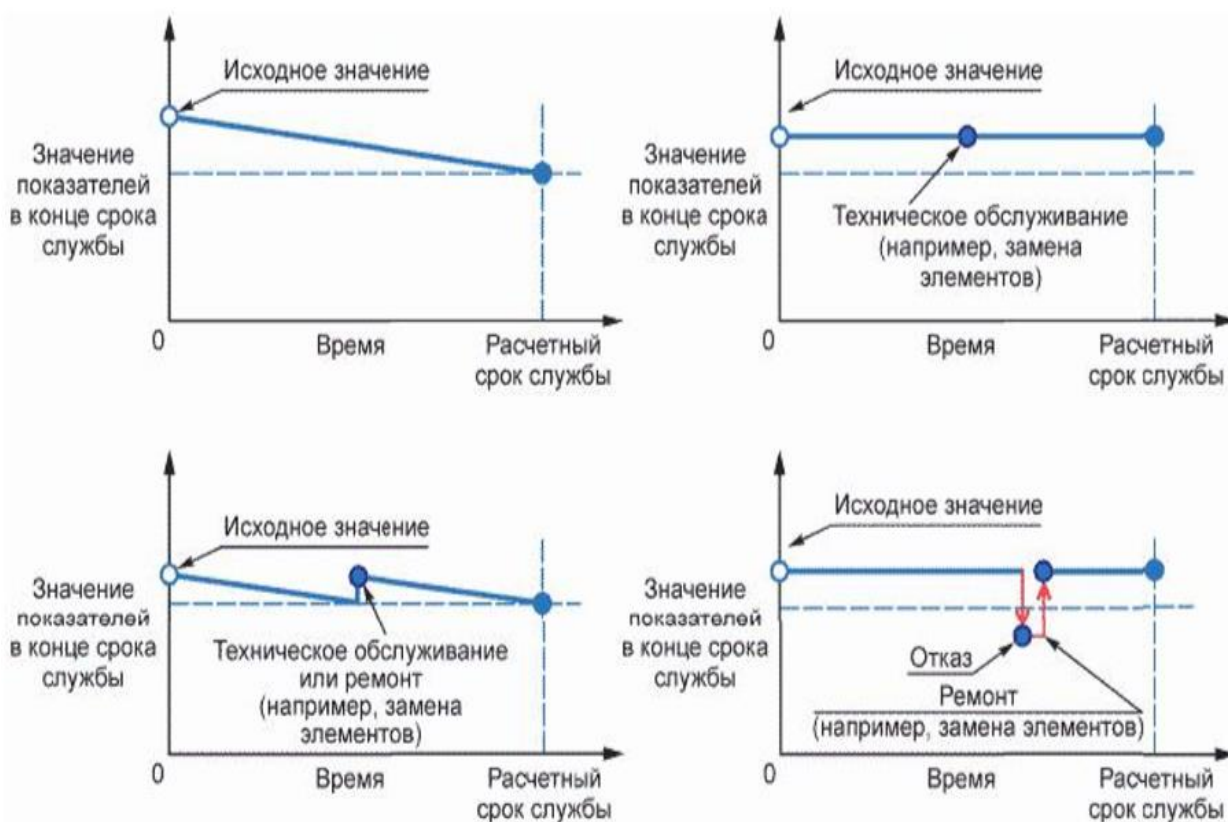


Рис. 6. Факторы, учитываемые при определении расчетного срока службы СНЭЭ [4, с. 18]

Отклик системы. Время отклика СНЭЭ на единичное ступенчатое возмущение – период времени между моментом T_0 , когда система, находящаяся в состоянии ожидания, получает уставку (или когда параметр энергосистемы изменяется достаточно для вызова отклика системы) и моментом T_3 , когда активная мощность СНЭЭ в ТПН достигает значения в пределах 2% от значения уставки (**рис. 7**).

Скорость изменения выходной переменной СНЭЭ – средняя скорость изменения активной мощности в единицу времени между моментами времени T_2 и T_1 (**рис. 7**), RR , Вт/с, определяется по формуле [3, с. 14]

$$RR = \frac{P(T_2) - P(T_1)}{T_2 - T_1}, \quad (3)$$

где T_1 – момент времени, в который активная мощность в ТПН становится выше значения 10% уставки;

T_2 – момент времени, в который активная мощность в ТПН становится выше значения 90% уставки.



Рис. 7. Время отклика на единичное ступенчатое возмущение и скорость изменения выходной переменной СНЭЭ [3, с. 15]

Типовые уставки отклика системы согласно [3, 4]:

- значение нормированной входной или выходной мощности для определения времени отклика на единичное ступенчатое возмущение;
- нормированные входная и выходная мощности соответственно для определения скорости изменения выходной переменной.

Мощность потребления вспомогательной подсистемы. Мощность потребления вспомогательной подсистемы СНЭЭ – это мощность, необходимая для работы вспомогательной подсистемы, которую измеряют или оценивают с учетом параметров подсистемы преобразования энергии для следующих пяти случаев [3, с. 15]:

- активная мощность 0 Вт, реактивная мощность 0 вар;
- нормированная активная выходная мощность;
- нормированная активная входная мощность;
- нормированная реактивная выходная мощность;
- нормированная реактивная входная мощность.

В случае если вспомогательная подсистема подключена к вспомогательной ТПН, мощность потребления вспомогательной подсистемы измеряют как входную мощность во вспомогательной ТПН.

Саморазряд. Саморазряд СНЭЭ – это потери энергии системы в остановленном состоянии за стандартный период времени. Стандартные периоды измерения саморазряда СНЭЭ составляют 1 ч, 1 сут. или 1 нед. Потребление энергии вспомогательной подсистемой не учитывают [3, с.15].

Нормированный диапазон напряжений. Для обеспечения функциональности верхний (нижний) предел нормированного диапазона напряжений СНЭЭ должен быть выше наибольшего (ниже наименьшего) напряжения сети соответствующего номинального напряжения электрической сети с учетом отклонений напряжения от номинального по ГОСТ 32144 [6].

Номинальное напряжение СНЭЭ находится между нижним ($U_{\min}$) и верхним ($U_{\max}$) пределами нормированного диапазона напряжений [3, с.16].

Значения номинальных и наибольших рабочих напряжений СНЭЭ, функционирующих в Единой энергетической системе России и технологически изолированных территориальных электроэнергетических системах, должны соответствовать ГОСТ Р 57382 [5].

Нормированный диапазон частот. Разрешенный диапазон отклонения от нормированной частоты называется диапазоном частот длительной работы и задает допустимое отклонение частоты от нормированного значения [3, с.16].

Номинальная частота СНЭЭ находится между нижним ($f_{\min}$) и верхним ($f_{\max}$) пределами нормированного диапазона частот в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [6].

Заключение. Материал обзорной лекции составлен на базе информации, приведенной в современных национальных стандартах Российской Федерации, гармонизированных со стандартами МЭК и ИЕС. Представленный материал полезен для обучающихся и способствует повышению уровня подготовки в рамках требуемых профессиональных компетенций в области возобновляемой энергетики и систем накопления.

Список литературы

1. Рынок систем накопления электроэнергии в России: Потенциал развития. Экспертно-аналитический доклад. / Под ред. Ю. Удальцова и Д. Холкина. РОСНАНО. Москва, 2018. – 70 с. // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: en.rusnano.com. –Дата обращения 10.12. 2020.

2. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Термины и определения : ГОСТ Р 58092.1-2018 / введ. 2019-03-01. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 54 с.

3. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Параметры установок и методы испытаний. Общее описание: ГОСТ Р 58092.2.1-2020 (МЭК 62933-2-1:2017) / введ. 2020-11-01. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 37 с.

4. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Проектирование и оценка рабочих параметров. Общие требования: ГОСТ Р 58092.3.1-2020 (IEC TS 62933-3-1:2018)/ введ. 2020-11-01. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 56 с.

5. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электроэнергетические системы. Стандартный ряд номинальных и наибольших рабочих напряжений / ГОСТ Р 57382-2017, введ. 2017-09-01 // Москва: Стандартинформ, 2017. – 8 с.

6. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / ГОСТ 32144-2013, введ. 2014 -07-01 // Москва : Стандартинформ, 2014. – 20 с.

© Л.П. Андрианова, З.Х. Павлова, М.И. Хакимьянов, Р.Т. Хазиева, 2020