УДК 621.355

**АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ОТКЛИКА СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

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: В статье дана краткая характеристика основных и дополнительных параметров СНЭЭ, установленных для испытаний действующими нормативными документами. Представлена обобщенная архитектура СНЭЭ, включающая подсистемы: основную и вспомогательную, контроля и управления; распределения и подключения с указанием точек подключения к сети помощью основного и вспомогательного стыковочных выводов. Изложена методика определения и испытаний параметров отклика: время отклика и скорость изменения выходной переменной СНЭЭ на входное ступенчатое воздействие; алгоритм и этапы испытаний параметров отклика.

Ключевые слова: Системы накопления электрической энергии, параметры и характеристики; типовая архитектура, точка подключения к сети; отклик системы на единичное ступенчатое воздействие; этапы испытаний.

TEST ALGORITHM FOR DETERMINING THE RESPONSE PARAMETERS OF THE ELECTRIC ENERGY STORAGE SYSTEM

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

Abstract: The article provides a brief description of the main and additional parameters of SNEE, established for testing by current regulatory documents. A generalized SNEE architecture is presented, including subsystems: main and auxiliary, control and control; distribution and connection with the indication of connection points to the network using the main and auxiliary connecting pins. The method of determining and testing the response parameters is described: response time and rate of change of the output variable of the SNEE to the input step effect; algorithm and stages of testing the response parameters.

Key words: Electrical energy storage systems, parameters and characteristics; typical architecture, connection point to the network; system response to a single step impact; test stages.

Введение.

В последние десятилетия в связи с интенсивным развитием технологий накопления энергии и созданием накопителей электрической энергии с высокими энергетическими показателями (мощности, энергоемкости, КПД и быстродействие), переосмыслена их место и роль в современных энергосистемах [1].

Накопители энергии в составе энергосистемы позволяют поддерживать баланс активной мощности, участвуя в энергообмене с энергосистемой, регулируя в течение суток выработку и потребление электроэнергии, причем они могут быть установлены в любой точке энергосистемы, там, где в них есть потребность. Кроме управления активной мощностью они одновременно способны выполнять функции регулирования напряжения в точке подключения, функции активного фильтра высших гармоник напряжения и тока, а также решать проблему симметрирования трехфазной электрической сети [3, 4].

Для СНЭЭ, предназначенных для работы в составе Единой энергетической системы России и технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем и относящихся к объектам диспетчеризации, установлены основные и дополнительные параметры, подлежащие испытаниям в соответствии с нормативными документами [2, 3, 4].

Параметры СНЭЭ

Перечень параметров СНЭЭ, установленных для испытаний их величин в соответствии с [2, 3, 4] представлен в таблице 1.

Таблица 1

Параметры СНЭЭ [5, 6]

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);
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 СНЭЭ, указанные в таблице 3, согласно ГОСТ [2, 3] измеряют или рассчитывают в точке подключения к сети (ТПН).

Технические требования, предъявляемые к СНЭЭ

В зависимости от решаемых задач к СНЭЭ предъявляются технические требования [2, 3, 4]:

- по функциональности (покрытие пиковых нагрузок, обеспечение требуемой частоты, режим работы виртуальной синхронной машины и др.);
- по параметрам подсистемы накопления энергии (энергоемкость, мощность и др.);
- по параметрам подсистемы преобразования энергии (время отклика, контроль статизма, мощность, мощность короткого замыкания и др.);
- по параметрам подсистемы защиты.

Для разработки оптимального решения, повышения адаптивности и эффективности функционирования системы требования к СНЭЭ должны быть четко определены с учетом требований электрической сети. На этапе проектирования, на системном уровне и после уточнения задач должны быть определены требования к СНЭЭ путем задания требований к соответствующим рабочим характеристикам СНЭЭ, включая [4]:

- нормированную входную и выходную мощность;
- кратковременную входную и выходную мощность;
- нормированную энергоемкость;
- время отклика;
- энергопотребление вспомогательной подсистемой;
- саморазряд;
- эффективность заряда-разряда;
- эффективность заряда-разряда рабочего цикла;
- время восстановления;
- значение показателей рабочих характеристик в конце срока службы.

Расчетный срок службы СНЭЭ должен быть указан на этапе проектирования. Но по истечении срока службы параметры СНЭЭ могут не соответствовать значениям показателей в конце срока службы.

Признаками этого могут служить:

- фактические значения входной и выходной энергоемкости СНЭЭ ниже значений, установленных для момента окончания срока службы;
- значения входной и выходной мощности во время процесса заряда и разряда системы ниже значений, определенных для момента окончания срока службы;
- эффективность заряда-разряда ниже величин, установленных для момента окончания срока службы;
- время отклика выше значений, определенных для момента окончания срока службы.

Требуемое время отклика устанавливается в соответствии с [4] для следующих режимов работы СНЭЭ:

- для автономной работы, режима следования за нагрузкой, работы по графику и дистанционного диспетчерского управления;
- для запуска СНЭЭ из режима ожидания;
- для переключения СНЭЭ из режима отбора активной мощности в режим отдачи активной мощности.

Для обеспечения устойчивости энергосистемы по запросу субъекта оперативно диспетчерского управления заказчик СНЭЭ должен предоставить информацию о значениях следующих параметров:

- время отклика;
- скорость изменения выходной переменной;
- токи подпитки точки короткого замыкания;
- способность поддержания напряжения в случае перенапряжения, прерывания или провала напряжения в сети;
- характеристика и способность регулирования.

Обобщенная архитектура СНЭЭ.

Типовая архитектура СНЭЭ со всеми структурными компонентами приведена на рис. 1.

Рис. 1. Обобщенная архитектура СНЭЭ

Методика определения и испытаний параметров отклика СНЭЭ

Время отклика СНЭЭ на единичное ступенчатое возмущение - это 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. 2) [3, с.17].

Типовой уставкой для определения времени отклика на единичное ступенчатое возмущение является значение нормированной входной или выходной мощности.

Скорость изменения выходной переменной СНЭЭ - средняя скорость изменения активной мощности $P(T_2)$ и $P(T_1)$ в единицу времени между моментами времени T_2 и T_1 (**рис. 2**), RR , Вт/с, определяется по формуле

$$RR = \frac{P(T_2) - P(T_1)}{T_2 - T_1}, \text{ где } T_1 - \text{ момент времени, в который активная мощность}$$

в ТПН становится выше значения 10% уставки;

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

Типовыми уставками для определения скорости изменения выходной переменной являются нормированные входная и выходная мощности соответственно.

Время отклика СНЭЭ измеряют в соответствии с [3, с.15] по методике, изложенной ниже. СНЭЭ должна поглощать или отдавать активную мощность в соответствии с уставкой, настроенной на нормированную входную или выходную мощность. Уставку и входную или выходную мощность в ТПН фиксируют при помощи системы сбора данных через равные интервалы времени с требуемым временным разрешением.

Рис. 2. Время отклика на единичное ступенчатое возмущение и скорость изменения выходной переменной СНЭЭ [3, с.16]

Для определения отклика системы регистрируют в соответствии с **рис. 3** четыре значения времени отклика на единичное ступенчатое возмущение ($SRT_1, SRT_2, SRT_3, SRT_4$) и четыре скорости изменения выходной переменной (RR_1, RR_2, RR_3, RR_4). Для задач обеспечения устойчивости энергосистемы при определении T_{0b} , T_{0c} , T_{0d} и T_{0e} учитывают дополнительное время между моментом регистрации параметра энергосистемы (частоты, напряжения) и моментом задания уставки системой контроля и управления СНЭЭ.

Рис. 3. Этапы определения отклика СНЭЭ [3, с.24]

Алгоритм проведения испытаний

Этап №1. Заряжают или разряжают СНЭЭ до степени заряженности $СЗ = 50\%$;

Этап №2. Задают уставку равной нулю. Уставку не меняют до тех пор, пока выходная мощность не составит $(0 \pm 2)\%$ от нормированной входной мощности.

Этап №3. Изменяют уставку на нормированную входную мощность. Уставку не меняют до тех пор, пока активная мощность в ТПН не достигнет уровня в пределах 2% от нормированной входной мощности (**рис. 4**).

Этап №4. Задают уставку равной нулю. Уставку не меняют до тех пор, пока активная мощность в ТПН не достигнет уровня $(0 \pm 2)\%$ от нормированной входной мощности (**рис. 5**).

Рис. 4. Этап №3[3, с. 24]

Рис. 5. Этап №4[3, с. 24]

Пояснения к рис. 4 - Этап №3:

T_{0b} - момент времени, в который СНЭЭ получает значение уставки;

T_{1b} - момент времени, в который активная мощность в ТПН становится выше 10% от нормированной входной мощности;

T_{2b} - момент времени, в который активная мощность в ТПН становится выше 90% от нормированной выходной мощности;

T_{3b} - момент времени, в который активная мощность в ТПН достигает уровня $\pm 2\%$ от целевого значения нормированной выходной мощности;

RR_1 - скорость изменения выходной переменной - отношение разности значений активной мощности в моменты времени T_{2b} и T_{1b} к интервалу времени между моментами времени T_{2b} и T_{1b} ;

SRT_1 - время отклика на единичное ступенчатое возмущение - интервал времени между моментами времени T_{3b} и T_{0b} .

Пояснения к рис. 5 - Этап №4:

T_{1c} - момент времени, в который активная мощность в ТПН становится ниже 90% от нормированной входной мощности;

T_{2c} - момент времени, в который активная мощность в ТПН становится ниже 10% от нормированной входной мощности;

T_{3c} - момент времени, в который активная мощность в ТПН достигает уровня $\pm 2\%$ от целевого значения нормированной входной мощности.

RR_2 - скорость изменения выходной переменной СНЭЭЭ - отношение разности значений активной мощности в моменты времени T_{2c} и T_{1c} к интервалу времени между моментами времени T_{2c} и T_{1c} ;

SRT_2 - время отклика на единичное ступенчатое возмущение - интервал времени между моментами времени T_{3c} и T_{0c} . T_{0c} - момент времени, в который СНЭЭ получает значение уставки.

Этап №5. Заряжают или разряжают СНЭЭ до степени заряженности $CЗ=50\%$ или до значения энергоемкости, согласованной между поставщиком и заказчиком СНЭЭ;

Этап №6. Изменяют уставку на нормированную выходную мощность. Уставку не меняют до тех пор, пока активная мощность в ТПН не достигнет уровня в пределах 2% от нормированной выходной мощности (**рис. 6**).

Этап №7. Задают уставку равной нулю. Уставку не меняют до тех пор, пока активная мощность в ТПН не достигнет уровня $(0\pm 2)\%$ от нормированной выходной мощности (**рис. 7**).

Рис. 6. Этап №6 [3, с. 24]

Рис. 7. Этап №7[3, с. 24]

Пояснения к **рис. 6 - Этап №6:**

T_{0d} - момент времени, в который СНЭЭ получает значение уставки;

T_{1d} - момент времени, в который активная мощность в ТПН становится выше 10% от нормированной выходной мощности;

T_{2d} - момент времени, в который активная мощность в ТПН становится выше 90% от нормированной выходной мощности;

T_{3d} - момент времени, в который активная мощность в ТПН достигает уровня $\pm 2\%$ от целевого значения нормированной выходной мощности.

RR_3 - скорость изменения выходной переменной СНЭЭ - отношение разности значений активной мощности в моменты времени T_{2d} и T_{1d} к интервалу времени между моментами времени T_{2d} и T_{1d} ;

SRT_3 - время отклика на единичное ступенчатое возмущение - интервал времени между моментами времени T_{3d} и T_{0d} .

Пояснения к **рис. 7 - Этап №7:**

T_{0e} - момент времени, в который СНЭЭ получает значение уставки;

T_{1e} - момент времени, в который активная мощность в ТПН становится ниже 90% от нормированной выходной мощности;

T_{2e} - момент времени, в который активная мощность в ТПН становится ниже 10% от нормированной выходной мощности;

T_{3e} - момент времени, в который активная мощность в ТПН достигает уровня $\pm 2\%$ от целевого значения нормированной выходной мощности.

RR_4 - скорость изменения выходной переменной СНЭЭ - отношение разности значений активной мощности в моменты времени T_{2e} и T_{1e} к интервалу времени между моментами времени T_{2e} и T_{1e} ;

SRT_4 - время отклика на единичное ступенчатое возмущение - интервал времени между моментами времени T_{3e} и T_{0e} .

Скорость сбора данных должна минимум в два раза превышать отношение полной нормированной мощности к скорости изменения выходной переменной системы.

Заключение. Параметры отклика (время отклика на единичное ступенчатое возмущение и скорость изменения выходной переменной СНЭЭ) относятся к параметрам системы, отвечающим за качество функционирования и за расчетный срок службы СНЭЭ. Так как с течением времени наблюдается тенденция ухудшения параметров СНЭЭ, и как следствие, уменьшение установленного на стадии проектирования расчетного срока службы. Для оценки соответствия фактического срока службы расчетному сроку службы, проводят испытания параметров СНЭЭ, включая и параметры отклика СНЭЭ.

Методика измерения и испытания параметров отклика СНЭЭ описана 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 (ИЕС TS 62933-3-1:2018) / введ. 2020-11-01. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 56 с.

5. Андрианова, Л.П. Терминология для классификации проектирования и установки систем накопления электроэнергии в интеллектуальной энергетике / Л.П. Андрианова, З.Х. Павлова, М.И. Хакимьянов, Р.Т. Хазиева // Новая наука — Новые возможности: сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса (1 ноября 2020 г.). – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2020. -73 с. – С.24-36.

6. Андрианова, Л.П. Понятийный аппарат для установления требований к системам накопления электроэнергии, взаимодействующими с электрической сетью / Л.П. Андрианова, З.Х. Павлова, М.И. Хакимьянов, Р.Т. Хазиева // Инновационное развитие науки: Фундаментальные и прикладные проблемы: монография. – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2020. - 92 с. – С.78-93.

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