

Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы

УДК 621.311:621.352

Приведены результаты испытаний головного промышленного образца системы накопления энергии (СНЭ-10-1200-400) номинальной мощностью 1200 кВ·А, энергоемкостью 400 кВт·ч и напряжением 10 кВ на базе литий-ионных аккумуляторных батарей при совместной работе с газопоршневыми установками (ГПУ) в составе экспериментальной энергосистемы с активной резкопеременной нагрузкой. Описаны ее структура, состав и параметры, а также состав и параметры системы накопления энергии (СНЭ). Испытания показали работоспособность испытываемого образца, высокую эффективность реализованных алгоритмов и подтвердили целесообразность применения СНЭ для сглаживания набросов/сбросов мощности ГПУ и исключения их аварийного отключения из-за бросков мощности нагрузки.

Бачурин П.А.,
ассистент кафедры Электроники и электротехники НГТУ

Гладков Д.С.,
магистрант кафедры Автоматизированных электро-энергетических систем НГТУ

Зырянов В.М.,
к.т.н., с.н.с., доцент кафедры Автоматизированных электро-энергетических систем НГТУ

Кучак С.В.,
старший преподаватель кафедры Электроники и электротехники НГТУ

Лебедев Д.Е.,
ведущий инженер технической поддержки ООО «Системы накопления энергии»

Нестеренко Г.Б.,
аспирант кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ, инженер технической поддержки ООО «Системы накопления энергии»

Пранкевич Г.А.,
инженер технической поддержки ООО «Системы накопления энергии»

Решетников А.Н.,
старший преподаватель кафедры Электроники и электротехники НГТУ

Савицкий А.М.,
начальник службы испытаний и сервиса ООО «Системы накопления энергии»

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отечественные технологии накопления энергии вышли на уровень практического применения в электроэнергетике. Внедрение систем накопления энергии (СНЭ) в электроэнергетические системы всех типов — одно из ключевых направлений развития энергетики России. Быстродействующие СНЭ позволяют решать ряд сложных задач гораздо более эффективно, чем это делается традиционными методами [1–5]. СНЭ — многофункциональное устройство, способное регулировать активную и реактивную мощность, частоту, выполнять функции активного фильтра высших гармоник, компенсировать несимметрию трехфазного напряжения.

Наибольший технический и экономический эффект от применения СНЭ в настоящее время может быть получен, прежде всего, на объектах распределенной

Ключевые слова:

система накопления энергии, газопоршневая установка, экспериментальные исследования, автономная энергосистема, резкопеременная нагрузка, нагрузочная диаграмма, литий-ионная аккумуляторная батарея



Рис. 1. Экспериментальная установка для испытаний совместной работы СНЭ-10-1200-400 и ГПУ

генерации, в Smart и Microgrids (в том числе с возобновляемыми источниками энергии), на автономных электростанциях нефтегазового сектора экономики. Преобладающая доля выработки электроэнергии в последнем случае производится в основном дизельными, газотурбинными и газопоршневыми установками.

Газопоршневые установки (ГПУ), также как и дизель-генераторные установки (ДГУ), отличаются надежностью конструкции и, в отличие от последних, работают не на дорогом дизельном топливе, а на различных видах газообразного топлива (природный газ, пропан, бутан, попутный нефтяной газ и т.д.), которые, как правило, в изобилии имеются в местах нефте- и газодобычи.

В то же время ГПУ, в отличие от ДГУ, имеет ряд характерных особенностей [6]:

- при мгновенных набросах/ сбросах нагрузки в 10–20% от номинальной мощности ГПУ отключается технологической защитой;
- скорость наброса/сброса мощности должна составлять не

более 1% в секунду от номинальной мощности ГПУ;

- при длительной работе нагрузка ГПУ должна составлять не менее 35–40% от номинальной мощности.

Необходимость учета этих особенностей в процессе эксплуатации ГПУ особенно важна, так как газопоршневые агрегаты широко применяются на автономных электростанциях нефте- и газодобывающих предприятий, нагрузка которых имеет ярко выраженный резкопеременный стохастический характер. Такой характер нагрузки, кроме всего прочего, приводит к повышенному износу оборудования и, следовательно, к повышенным издержкам на ремонт и обслуживание ГПУ.

В настоящей статье описываются результаты экспериментальных испытаний и исследований системы накопления энергии, выполненные ООО «СНЭ», ООО «СПТ» и НГТУ 24 мая 2019 года в Новосибирске. Испытания проводились с головным промышленным образцом СНЭ-10-1200-400 УХЛ1 мощностью 1200 кВ·А, энергоемкостью 400 кВт·ч, номинальным напряжением 10 кВ про-

изводства ООО «СНЭ», предназначенного для работы в составе автономной системы электроснабжения на базе ГПУ (рисунок 1).

Цель испытаний — проверка соответствия головного образца СНЭ, параметров системы в целом и каждой из ее подсистем требованиям технического задания, подтверждение эффективности СНЭ для обеспечения режима сглаживания набросов/ сбросов мощности нагрузки (ограничения скорости нарастания/убывания мощности, потребляемой от ГПУ).

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки для испытания СНЭ представлена на рисунке 2. В составе установки две ГПУ, силовые трансформаторы, секционированная активная нагрузка, величина которой дискретно изменяется с помощью коммутационных аппаратов, система накопления энергии, контрольно-измерительное и регистрирующее оборудование, система управления.

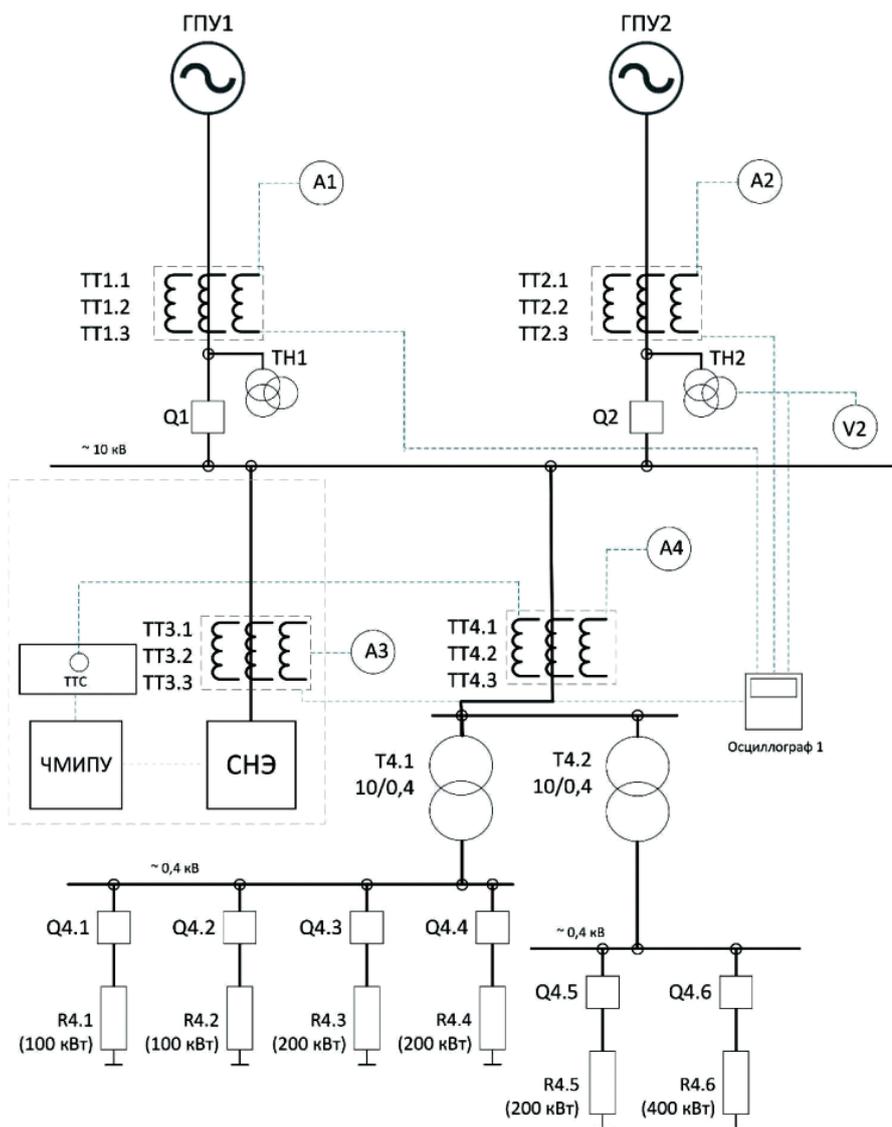


Рис. 2. Принципиальная схема испытательной экспериментальной установки: СНЭ — система накопления энергии; ГПУ1, ГПУ2 — газопоршневые установки; Т4.1, Т4.2 — силовые трансформаторы; R4.1–R4.6 — активные нагрузочные сопротивления; Q1, Q2, Q4.1–Q4.6 — выключатели; ТН1 и ТН2 — измерительные трансформаторы напряжения; ТТ1.1–ТТ4.3 — измерительные трансформаторы тока; ЧМИПУ — человеко-машинный интерфейс подсистемы управления; ТТС — трансформатор тока суммирующий

СОСТАВ ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В составе экспериментальной установки использованы две ГПУ GmbH MWM TCG 2020 V12K с генераторами AvK DIG 120 i/4, работающие на природном газе. Технические характеристики ГПУ приведены в таблице 1 [7].

Для моделирования активной резкопеременной нагрузки использовался модуль коммутирования нагрузки (МКН), позволяющий с заданной периодичностью подключать и отключать блоки активной нагрузки:

- 2 нагрузочных блока (модуля) ИС-400-100, с активной нагрузкой 100 кВт каждый;
- 2 нагрузочных блока (LOAD BANKS), с активной нагрузкой 400 кВт каждый (мощность одного из блоков искусственно ограничена до 200 кВт);
- 2 нагрузочных блока (электрокалориферы) КЭВ-60, с активной нагрузкой 200 кВт каждый.

В качестве испытуемой системы накопления энергии использовалась СНЭ-10-1200-400. В ходе испытаний СНЭ должна была обеспечивать режим сглаживания набросов/сбросов мощности нагрузки в экспериментальной автономной системе. Связь между литий-ионными аккумуляторными батареями и энергосистемой осуществляется с помощью силового трансформатора и двунаправленного транзисторного преобразовате-

Табл. 1. Технические характеристики MWM TCG 2020 V12K на частоте 50 Гц

Параметр	Значение
Электрическая мощность, кВт	1125
Тепловая мощность, кВт	1253
Электрический КПД, %	40,9
Тепловой КПД, %	45,6
Общий КПД, %	86,5
Капитальный ремонт при работе на природном газе, через ч	64 000
Скорость вращения, об./мин.	1500
Средняя скорость поршня, м/с	9,8
Сухой вес агрегата, кг	11 700

Табл. 2. Технические характеристики GBS-LFP100AH

Параметр	Значение
Емкость, А·ч	100
Материал положительного электрода	литий-феррум-фосфат
Номинальное напряжение, В	3,2
Максимальный длительно допустимый ток разряда, А	300
Максимальный длительно допустимый ток заряда, А	100
Максимальный импульсный ток, А	1000
Внутреннее сопротивление, Ом, не более	0,6
Саморазряд в месяц, %, не более	1
Количество циклов зарядки, раз, более	2000
Масса, кг	2,8
Габаритные размеры, Д×Г×В, мм	126 × 65 × 253
Температура эксплуатации, °С	–20...+65

Табл. 3. Технические данные аккумулятора модуля МА6×200.600

Параметр	Значение
Тип аккумуляторов	GBS-LFP100AH
Количество аккумуляторов, шт.	12
Количество аккумуляторных ячеек, шт.	6
Номинальное напряжение, В	19,2

ля, собранного по классической трехфазной мостовой схеме.

В подсистеме накопления (ПН) используются аккумуляторы GBS-LFP100AH, имеющие технические характеристики, приведенные в таблице 2 [8]. Основным элементом ПН является аккумуляторный модуль МА6×200.600, представляющий собой сборку из шести аккумуляторных ячеек емкостью по 200 А·ч, собранных последовательно, элементов системы управления аккумуляторной батареей и корпуса. В СНЭ используются две модификации модулей — с положительным и отрицательным электродами. Технические характеристики модуля представлены в таблице 3.

Модули размещаются в шесть рядов на стеллажах. Каждая батарея (из трех) состоит из двух стеллажей: в первом, помимо 15 модулей, располагается коммутационное силовое оборудование и вторичные цепи, а во втором размещены 18 аккумуляторных модулей.

Подсистема преобразования электрической энергии (ПП) реализована на базе трех трехфазных силовых преобразователей по 400 кВ·А каждый и выполняет следующие функции:

- преобразование трехфазного напряжения переменного тока промышленной частоты в напряжение постоянного тока и заряд аккумуляторов ПН;
- поддержание аккумуляторов ПН в режиме, обеспечивающем их работоспособность и наибольший ресурс;
- преобразование напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока промышленной частоты и выдачу

мощности на нагрузку или в сеть.

В системе управления преобразователя использованы элементы теории мгновенной мощности и блок фазовой подстройки частоты (phase locked loop) [9, 10].

ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЙ

ГПУ имеют достаточно серьезные ограничения по допустимой динамике изменения нагрузки, что существенно осложняет их применение в энергосистемах с резкопеременной нагрузкой. Поэтому основное внимание в ходе испытаний уделялось проверке эффективности и отладке алгоритмов управления СНЭ для уменьшения скорости изменения мощности ГПУ при резких бросках нагрузки. Особый интерес при этом представляет анализ переходных процессов, поскольку основные особенности изменения режимных параметров автономных энергосистем с ГПУ на нефте- и газодобывающих предприятиях — резкие и глубокие просадки и забросы частоты и напряжения, сопровождающиеся повышенным расходом топлива и моторесурса, а при бросках (более 10–20% мощности нагрузки) — отключением ГПУ технологическими защитами.

В качестве возможных алгоритмов управления СНЭ для совместного применения с ГПУ в автономных системах были испытаны два алгоритма.

Первый алгоритм предназначен для ограничения скорости изменения мощности генератора при резких изменениях нагрузки (далее — Режим компенсации dP/dt). При набросе или сбросе нагрузки СНЭ обеспечивает плавное изменение генерируемой мощности, значительно уменьшая просадки и забросы напряжения, частоты, а также исключая возможность отключения ГПУ технологическими защитами.

Второй алгоритм предназначен для ограничения максимальной и минимальной мощности, генерируемой ГПУ (далее — Режим ограничения мощности). При пиках потребления СНЭ выдает мощность, равную разности между мощностью нагрузки и пре-

дельным заданным значением мощности ГПУ (верхняя уставка), а при малой нагрузке догружает ее до минимального заданного значения (нижняя уставка), накапливая при этом энергию. Таким образом сглаживается график нагрузки ГПУ, что позволяет эксплуатировать генераторный агрегат в более благоприятном режиме, минимизируя расход топлива и моторесурса. Сглаживание нагрузочной диаграммы дает возможность выбирать установленную мощность ГПУ существенно меньше максимума нагрузки.

Программа испытаний включала следующие опыты:

1. Проверка работоспособности СНЭ при реализации первого алгоритма в режиме ограничения скорости изменения мощности ГПУ во время набросов и сбросов мощности нагрузки при разных рабочих циклах нагрузки и разных уставках по скорости изменения мощности.
2. Проверка работоспособности СНЭ при реализации второго алгоритма в режиме ограничения максимальной и минимальной мощности ГПУ в разных нагрузочных циклах при различных уставках.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПЕРВОГО АЛГОРИТМА «РЕЖИМ КОМПЕНСАЦИИ dP/dt »

При проведении испытаний скорость изменения суммарной мощности, генерируемой ГПУ 1 и 2, ограничивалась значением 22,5 кВт/с — 1% от суммарной мощности (2250 кВт) двух ГПУ. В алгоритме управления СНЭ реализован экспоненциальный характер изменения мощности.

В ходе проведения опытов исследовались режимы работы СНЭ при компенсации набросов и сбросов нагрузки различной мощности — 100, 200, 400, 600, 800, 1200 кВт.

Испытательная схема показана на рисунке 2.

Начальное состояние схемы:

- выключатели Q4.1–Q4.3 отключены;
- выключатели Q1, Q2, Q4.4–Q4.6 включены;
- мощность нагрузки составляет 800 кВт;

– СНЭ находится в режиме ожидания.

Рабочие циклы изменения нагрузки (рисунок 3) моделировались путем коммутации нагрузочных активных сопротивлений. При этом базовая неотключаемая нагрузка составляла 35–40 кВт (питание вентиляторов нагрузки, осветительное и бытовое оборудование испытательной установки).

Запись мгновенных значений токов ГПУ1, ГПУ2, СНЭ и напряжений на шинах 10 кВ производилась на цифровой осциллограф с частотой дискретизации 25 кГц. На основании их рассчитывались все остальные мгновенные значения режимных параметров.

Фрагмент осциллограммы, полученной при реализации рабочего цикла для участка с 27 по 36 минуту, представлен на рисунке 4. Без участия СНЭ реализовать такой график нагрузки было бы невозможно — технологическая защита ГПУ отключила бы ее при первом же броске мощности. СНЭ в начальный момент полностью «принимает на себя» наброс или сброс мощности нагрузки и плавно «передает» ее на ГПУ по экспоненциальному закону.

Фрагмент осциллограммы, полученной при реализации рабочего цикла с 60 по 71 минуту, представлен на рисунке 5. Эксперимент показал высокую эффективность СНЭ при ограничении скорости изменения мощности ГПУ при набросах/сбросах нагрузки в диапазоне намного большем, чем в предыдущем случае — 600, 800 и 1200 кВт. Без СНЭ такие броски мощности приводят к безусловному срабатыванию технологической защиты и отключению ГПУ.

На рисунке 6 представлены осциллограммы, полученные при проведении опыта, аналогичного вышеописанному, но выполненному при более высокой частоте изменения нагрузки. Нагрузка изменялась в широком диапазоне каждые 10 секунд и, поскольку допустимая скорость изменения мощности ГПУ была принята такой же, как и в описанных выше опытах, ГПУ не успевала выйти

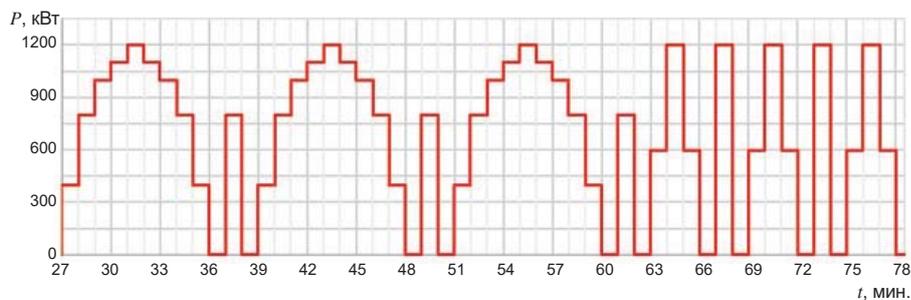


Рис. 3. Фрагмент переменной части рабочего цикла нагрузки с дискретностью 1 минута для проверки способности СНЭ компенсировать набросы и сбросы мощности

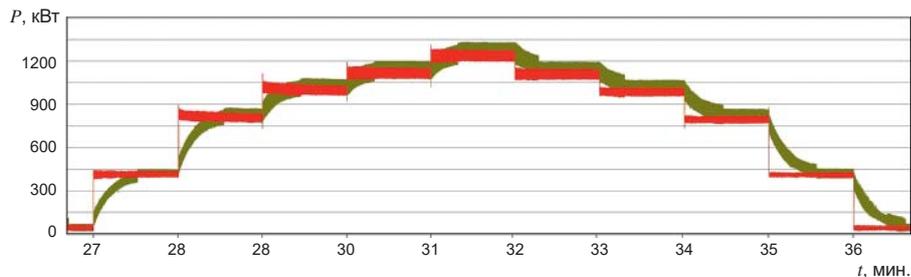


Рис. 4. Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет) и мощности ГПУ (зеленый цвет) при допустимой скорости изменения мощности (уставке) 22,5 кВт/с

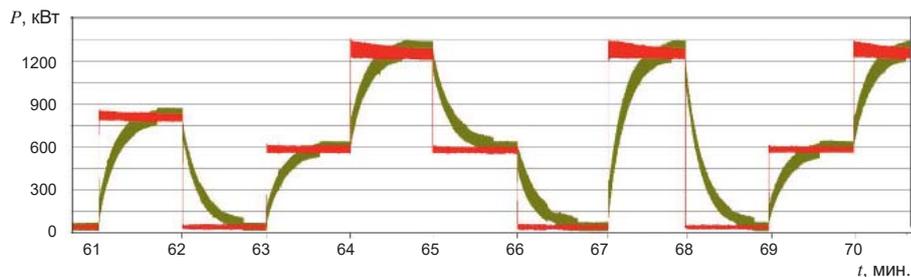


Рис. 5. Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет) и мощности ГПУ (зеленый цвет) при допустимой скорости изменения мощности (уставке) 22,5 кВт/с

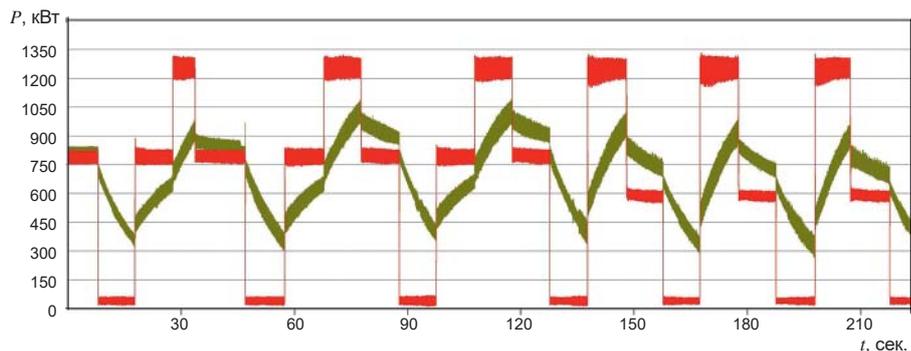


Рис. 6. Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет) и мощности ГПУ (зеленый цвет) при допустимой скорости изменения мощности (уставке) 22,5 кВт/с

на режим полного покрытия нагрузки. За счет этого при большей частоте резких изменений нагрузки значительно большая доля ее переменной составляющей обеспечивается ресурсами СНЭ.

Во всех описанных опытах СНЭ при каждом набросе нагрузки

переходила в режим выдачи мощности, а при сбросе — в режим потребления избыточной мощности ГПУ, выполняя роль демпфера.

На рисунках 7 и 8 приведены осциллограммы частоты, мощности ГПУ и нагрузки при критическом значении сброса нагрузки с 1200 до 1000 кВт с участием

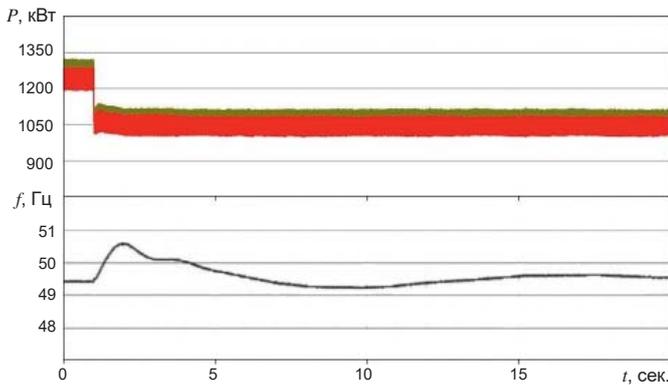


Рис. 7. Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет), мощности ГПУ (зеленый цвет) и мгновенного значения частоты на шинах ГПУ без СНЭ при сбросе мощности нагрузки с 1200 кВт до 1000 кВт

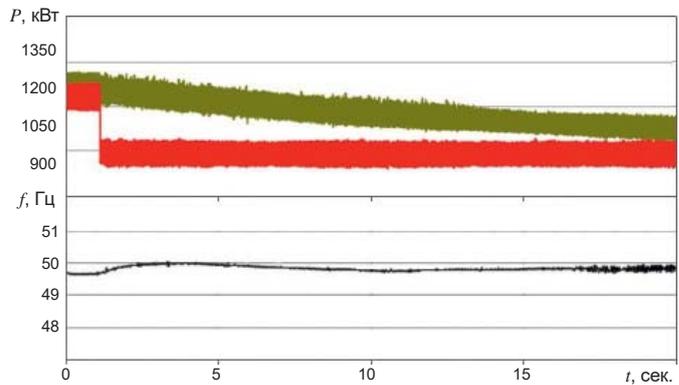


Рис. 8. Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет), мощности ГПУ (зеленый цвет) и мгновенного значения частоты на шинах ГПУ со СНЭ при сбросе мощности нагрузки с 1200 кВт до 1000 кВт

и без участия СНЭ. В этих опытах был реализован тот же алгоритм управления, который описан выше. Переходные процессы при участии СНЭ протекают со значительно меньшими отклонениями режимных параметров, прежде всего частоты, нежели без СНЭ, что благоприятно сказывается на условиях эксплуатации ГПУ и подтверждает эффективность реализованного алгоритма управления.

При реализации первого алгоритма во всех выполненных опытах не было зафиксировано отключений ГПУ технологической защитой по причине набросов и сбросов мощности нагрузки. Время реакции СНЭ на наброс/сброс мощности нагрузки составило не более 10 мс. Значительно улучшилось качество переходных процессов. Подтверждена работоспособность СНЭ и показана эффективность алгоритма управления для сглаживания бросков мощности нагрузки.

РЕАЛИЗАЦИЯ ВТОРОГО АЛГОРИТМА «РЕЖИМ ОГРАНИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ»

В ходе этого испытания СНЭ с предварительно заряженными аккумуляторами ПН работала на ограничение суммарной максимальной и минимальной мощности двух ГПУ (нижняя уставка — 900 кВт, верхняя — 1100 кВт). При выходе мощности нагрузки за пределы указанных значений разница между уставкой и фактической нагрузкой компенсировалась за счет

СНЭ. Испытательная схема и начальные условия при проведении испытаний были теми же самыми, что и в предыдущем случае.

Во время испытаний задавался резкопеременный график изменения мощности нагрузки от 800 кВт до 1200 кВт. Время реакции СНЭ на изменение мощности нагрузки не превышало заданного ограничения в 20 мс, а мощность, генерируемая ГПУ 1 и 2, не выходила за установленные пределы 900 и 1100 кВт (рисунок 9).

По такому же графику, но с разными ограничениями диапазона мощности был выполнен ряд опытов, которые подтвердили высокую эффективность СНЭ для решения поставленной задачи. При сближении значений верхней и нижней уставок происходит все большее сглаживание графика мощности ГПУ и его приближение к среднему значению графика мощности нагрузки, что позволяет ГПУ работать в более экономичном режиме с меньшим удельным расходом топлива. К тому же появляется возможность замены «штатного» генераторного агрегата на агрегат меньшей мощности, близкой

к среднему значению мощности графика нагрузки. Регулирование переменной части графика нагрузки в этом случае полностью выполняется за счет СНЭ. При этом достигается комплексный эффект: минимальный удельный расход топлива, минимальная стоимость агрегата, минимальные издержки на его обслуживание, увеличение моторесурса приводного двигателя, снижение потерь в генераторе от переходных процессов, обусловленных резкопеременной нагрузкой.

Время реакции СНЭ на изменение мощности нагрузки при проведении опытов составило не более 10 мс, а суммарная выходная мощность ГПУ1 и ГПУ2, не выходила за установленные пределы — нижнюю и верхнюю уставки мощности.

ВЫВОДЫ

Впервые проведенные в РФ испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 (мощность 1200 кВА и энергоемкость 400 кВт·ч) при совместной работе с ГПУ на резкопеременную нагрузку в составе эксперименталь-

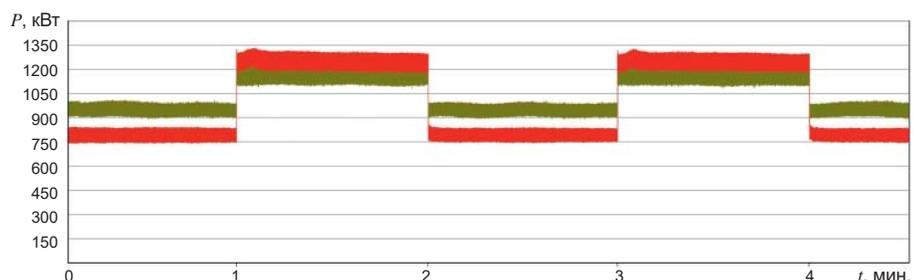


Рис. 9. Осциллограммы мощности нагрузки (красный цвет) и мощности ГПУ (зеленый цвет) при ограничении минимума и максимума мощности ГПУ

ной испытательной установки подтвердили работоспособность всех подсистем СНЭ и высокую эффективность предложенных алгоритмов. Реализованные алгоритмы управления СНЭ значительно улучшили условия эксплуатации ГПУ за счет существенного снижения интенсивности переходных процессов, что ведет к повышению технико-экономических показателей ГПУ.

Применение СНЭ совместно с ГПУ, работающей на резкопеременную нагрузку, позволяет ограничивать скорость изменения мощности генератора до допустимых значений. За счет этого существенно снижаются требования к типу генераторного агре-

гата, работающего на резкопеременную нагрузку, что особенно актуально для автономных энергосистем, в составе которых эксплуатируются ГПУ. Кроме того, при ограничении скорости изменения мощности генератора при его работе на резкопеременную нагрузку кардинально снижается амплитуда крутильных моментов на валу генератора, обеспечивается более благоприятный режим его работы, снижается расход топлива, экономится моторесурс ГПУ.

Использование СНЭ в режиме ограничения максимальной и минимальной нагрузки на ГПУ позволяет эксплуатировать ГПУ без риска отключений технологическими

защитами при резкопеременном графике нагрузки и в режимах малой нагрузки. Также может быть достигнут значительный экономический эффект путем выбора генераторного агрегата не по максимальной мощности нагрузки, а с учетом ограничения ее пиков. За счет этого уменьшаются капитальные затраты на основное оборудование, затраты на запасные части, эксплуатационные издержки и снижается удельный расход топлива [5]. Наибольший эффект от замены мощного ГПУ на агрегат меньшей мощности по расходу топлива достигается при низких значениях коэффициента использования установленной мощности заменяемого агрегата. 

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердников Р.Н., Фортов В.Е., Шакарян Ю.Г., Деньщиков К.К. Гибридный накопитель энергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // Энергия единой сети, 2013, № 1. С. 40–51.
2. Zobaа A.F. Energy storage technologies and applications. Rijeka, Croatia: Intech, 2013. 328 p.
3. Кононенко В.Ю., Вещунов О.В., Билашенко В.П., Смоленцев Д.О. Эффекты применения накопителей энергии в изолированных энергосистемах России // Арктика: экология и экономика, 2014, № 2(14). С. 61–66.
4. Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии / Министерство энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/9029>.
5. Зырянов В.М., Кучак С.В., Бачурин П.А., Харитонов С.А., Метальников Д.Г., Гармаш Т.Г., Ворошилов А.Н., Фролов Д.А. Экспериментальные исследования и испытания совместной работы системы накопления энергии и ДГУ в составе автономной энергосистемы // Промышленная энергетика, 2018, № 10. С. 2–10.
6. Илюшин П.В., Куликов А.Л., Березовский П.К. Эффективное использование накопителей электрической энергии для предотвращения отключений объектов распределенной генерации при кратковременных отклонениях частоты // Релейная защита и автоматизация, 2019, № 4. С. 32–39.
7. Газовый двигатель TCG 2020. URL: <https://www.mwm.com.ru/gazovye-dvigateli-blochnye-tehc/gazovye-dvigateli-generatornyye-ustanovki/tcg-2020/>.
8. Техническая карта GBS-LFP100AH. URL: <https://prometheusenergy.ru/product/litij-ionnyj-akkumulyator-gbs-lfp100ah-a/>.
9. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. IEE Press, John Wiley and Sons Inc., 2007. 389 p.
10. Dybko M.A., Brovanov S.V. Active power filter with battery energy storage based on NPC inverters / 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM): [proc.], Altai, Erlagol, 29 June - 3 July 2015. IEEE, 2015, pp. 415–421.

REFERENCES

1. Berdnikov R.N., Fortov V.E., Shakarjan Ju.G., Denshnikov K.K. Hybrid energy storage for unpgbased on batteries and supercapacitors // Energy of unifiedgrid, 2013, no. 1, pp. 40-51. (in Russian)
2. Zobaа A.F. Energy storage technologies and applications. Rijeka, Croatia: Intech, 2013. 328 p.
3. Kononenko V.Ju., Veshhunov O.V., Bilashenko V.P., Smolencev D.O. Effects of the use of energy storage in isolated power systems in Russia // Arctic: Ecology and Economy, 2014, no. 2(14), pp. 61-66. (in Russian)
4. The first Russian energy storage system of high power was developed at the NSTU / The Ministry of Education and Science of Russia, 2018. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/9029> (in Russian).
5. Zyryanov V.M., Kuchak S.V., Bachurin P.A., Kharitonov S.A., Metal'nikov D.G., Garmash T.G., Voroshilov A.N., Frolov D.A. Experimental studies and tests of the joint operation of the energy storage system and the DGU as a part of an autonomous power system // Industrial power engineering, 2018, no. 10, pp. 2-10. (in Russian)
6. Ilyushin P.V., Kulikov A.L., Berезovskiy P.K. Effective application of electric energy storage for prevention of distributed generation units tripping due to short-time frequency deviations // Relay protection and automation, 2019, no. 4, pp. 32-39. (in Russian)
7. Gas engine TCG 2020. URL: <https://www.mwm.com.ru/gazovye-dvigateli-blochnye-tehc/gazovye-dvigateli-generatornyye-ustanovki/tcg-2020/> (in Russian)
8. Technical specifications GBS-LFP100AH. URL: <https://prometheusenergy.ru/product/litij-ionnyj-akkumulyator-gbs-lfp100ah-a/>. (in Russian)
9. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. IEE Press, John Wiley and Sons Inc., 2007, pp. 389.
10. Dybko M.A., Brovanov S.V. Active power filter with battery energy storage based on NPC inverters / 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM): [proc.], Altai, Erlagol, 29 June - 3 July 2015. IEEE, 2015, pp. 415–421.