

ГИБРИДНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ЕНЭС НА БАЗЕ АККУМУЛЯТОРОВ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

АВТОРЫ:

БЕРДНИКОВ Р.Н.
ОАО «ФСК ЕЭС»

ФОРТОВ В.Е.,
АКАДЕМИК РАН

СОН Э.Е.,
ЧЛЕН-КОРП. РАН

ДЕНЬЩИКОВ К.К.,
Д.Т.Н.
ОИВТ РАН

ЖУК А.З.,
Д. Ф.-М. Н.
ОИВТ РАН

НОВИКОВ Н.Л.,
Д.Т.Н.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ШАКАРЯН Ю.Г.,
Д. Т. Н.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Загорская ГАЗС -
гидроаккумулирующая
электростанция,
посредством которой
удается аккумулировать
(запасать) электрическую
энергию, возвращая ее
в энергосистему по мере
необходимости
Фото ИТАР-ТАСС

В 2012 году по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» Объединенный институт высоких температур Российской академии наук в качестве главного исполнителя разработал, изготовил и провел экспериментальные исследования гибридного накопителя энергии на базе литий-ионных аккумуляторов и наборных суперконденсаторов. В работе принимали участие в качестве соисполнителей: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» (концепция использования гибридных накопителей энергии в ЕНЭС, разработка и изготовление

устройства сопряжения с сетью), ООО «НПО «ССК» (разработка и изготовление батареи литий-ионных аккумуляторов), ЗАО «НПО «Технокор» (разработка и изготовление батареи суперконденсаторов), ООО «НПП «СПТ» (разработка и изготовление устройства сопряжения с сетью). Работа выполнялась при поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы» Министерства образования и науки.



Разработка и внедрение современной технологии энергоаккумуляции являются важными и актуальными направлениями развития ЕНЭС России. Наличие энергоемких и мощных накопителей в качестве промежуточных устройств между источниками генерации энергии и потребителем позволяет освободиться от жесткого требования ежечасного соответствия генерации энергии ее потреблению.

К настоящему времени создан широкий спектр накопителей, построенных на различных принципах, различающихся как технико-экономическими показателями, так и функциональным назначением [1]: гидравлические и пневматические аккумуляторы, маховики, сверхпроводящие индуктивные накопители, емкостные накопители и разнообразные электрохимические накопители.

Интерес к накопителям электроэнергии значительно возрос в последнее время в связи с активизацией работ по созданию интеллектуальных электроэнергетических систем, в которых эти устройства играют роль одного из ключевых элементов. В интеллектуальных сетях накопители выполняют целый ряд важных функций, таких как:

- выравнивание графиков нагрузки в сети;
- демпфирование кратковременных колебаний активной и реактивной мощности и частоты;
- снятие или существенное сокращение нерегулярных колебаний в межсистемных линиях электропередачи для повышения их пропускной способности;
- обеспечение бесперебойного питания собственных подстанций и особо ответственных потребителей;
- обеспечение стабильной

и устойчивой работы децентрализованных и нетрадиционных источников, работающих как автономно, так и в составе ЕНЭС.

Накопители на основе аккумуляторных батарей большой энергоемкости считаются наиболее перспективными для использования в интеллектуальных электроэнергетических системах. Накопители подобного рода имеют ряд преимуществ (как следует из опыта эксплуатации более тысячи накопителей мегаваттного класса на основе натрий-серных аккумуляторов компаний NGK Insulator и Xcell Energy [2,3]), а именно:

- возможность реализации модульного исполнения и компактность конструкции;
- функциональная гибкость, обеспечивающая реализацию различных режимов работы;
- широкие возможности автоматизации процессов управления и контроля;
- простота встраивания в системы интеллектуальных электрических сетей.

Основными недостатками таких накопителей являются высокий ток саморазряда и низкая удельная энергоемкость. Следует отметить, что для некоторых из перечисленных выше применений эти недостатки оказываются ключевыми. Что касается накопителей на основе литий-ионных аккумуляторов, то они лишены этих недостатков. Именно поэтому в настоящее время к накопителям этого типа проявляется повышенный интерес. Конкретные особенности и недостатки накопителей на основе литий-ионных аккумуляторов (большой мощности) еще предстоит осознать, т.к. к настоящему моменту подобных устройств выпущено всего несколько десятков и работают они

ИНФОРМАЦИЯ

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Накопители энергии делятся на электростатические и электромашинные.

К первым относятся аккумуляторные батареи большой энергоемкости (АББЭ), накопители энергии на основе суперконденсаторов, накопители энергии на основе низкотемпературных (охлаждение жидким гелием) сверхпроводников.

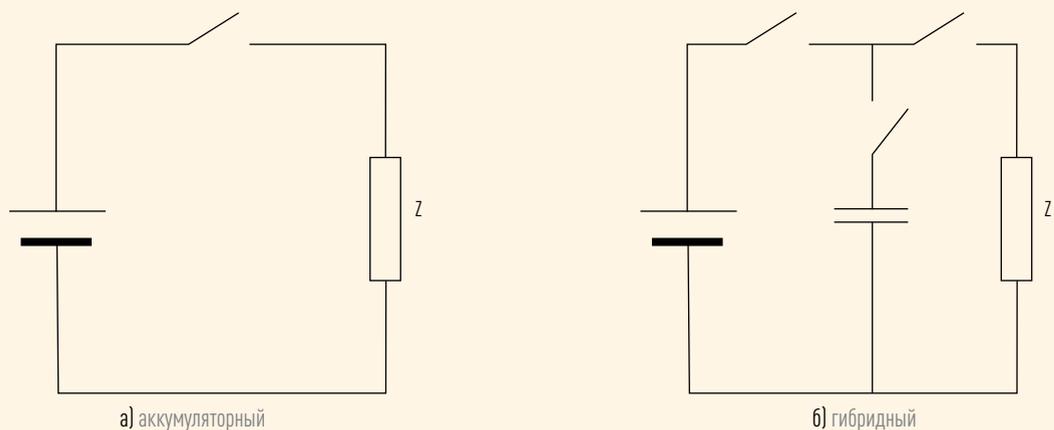
Все типы электростатических накопителей связываются с сетью через устройства силовой электроники – преобразователи тока или напряжения.

В настоящее время используется новое поколение суперконденсаторов с повышенными энергетическими характеристиками. Ожидаемое применение сверхпроводниковых накопителей – 2015–2020 гг.

К электромашинным накопителям электроэнергии относятся два вида комплексов:

- синхронные машины с преобразователями частоты в первичной цепи с маховиками на валу;
- асинхронизированные машины с маховиками на валу.

УПРОЩЕННЫЕ СХЕМЫ НАКОПИТЕЛЕЙ



а) аккумуляторный

б) гибридный

Более широкие функциональные возможности гибридного накопителя символически иллюстрируются возможностью реализовать различные схемы включения батарейки и конденсатора путем различных комбинаций замкнутых и разомкнутых ключей.

Рис. 1

по существу в режимах опытной эксплуатации. Впрочем, уже сейчас понятно, что и эти относительно новые накопители обладают рядом недостатков, в той или иной степени присущих всем их аккумуляторным собратьям. Это:

- высокая удельная стоимость;
- недостаточный ресурс работы (небольшое количество циклов заряд-разряд);
- существенное уменьшение ресурса при работе в пиковых режимах при разряде и заряде;
- наличие специальных требований к глубине разряда.

ГИБРИДНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ

Для того чтобы минимизировать влияние вышечисленных недостатков на технико-экономические характеристики аккумуляторных

систем накопления, нами был предложен необычный для стационарной энергетики подход, который, однако, можно считать как бы уже апробированным при создании тяговых установок для электрического и гибридного транспорта [3]. Суть подхода состоит в создании накопителя, комбинирующего аккумуляторную батарею и батареи суперконденсаторов.

В этой схеме аккумулятор, имея приемлемую энергоемкость (для литий-ионных систем 90-150 Вт•ч/кг), обладает относительно небольшим (от 500 до 3000 циклов заряд-разряд) ресурсом. Более того, работа аккумулятора (как и любого другого химического источника тока) в режимах больших мощностей резко снижает его энергоемкость и срок эксплуатации.

В то же время суперконденсатор имеет низкую энергоемкость (1-5 Вт•ч/кг), но весьма большой ресурс – до 10⁶ циклов заряд-разряд. Суперконденсатор легко справляется с высокими токами нагрузки. При заданном исходном напряжении

его максимальная мощность, как и у обычного конденсатора, определяется только импедансом цепи и самого суперконденсатора. Можно предположить, что гибридное сочетание аккумуляторов и суперконденсаторов в одном накопителе может дать существенный эффект. Так, суперконденсатор без подключения аккумулятора компенсирует возмущения длительностью до нескольких первых минут. При более длительных возмущениях (минуты, часы) в действие включается аккумуляторная часть накопителя. А наличие в составе накопителя суперконденсаторной части (при параллельном с аккумулятором включении) позволяет сглаживать фронты импульсов тока и напряжения, обеспечивая тем самым снижение мгновенной мощности, отдаваемой или получаемой аккумуляторной частью накопителя.

Параллельное включение аккумуляторов и суперконденсаторов также обеспечивает как минимум двукратное увеличение мощности накопителя. Разумеется, в течение времени, на которое рассчитана энергоемкость суперконденсатора.

СРАВНЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ СТОИМОСТЕЙ НАКОПИТЕЛЕЙ

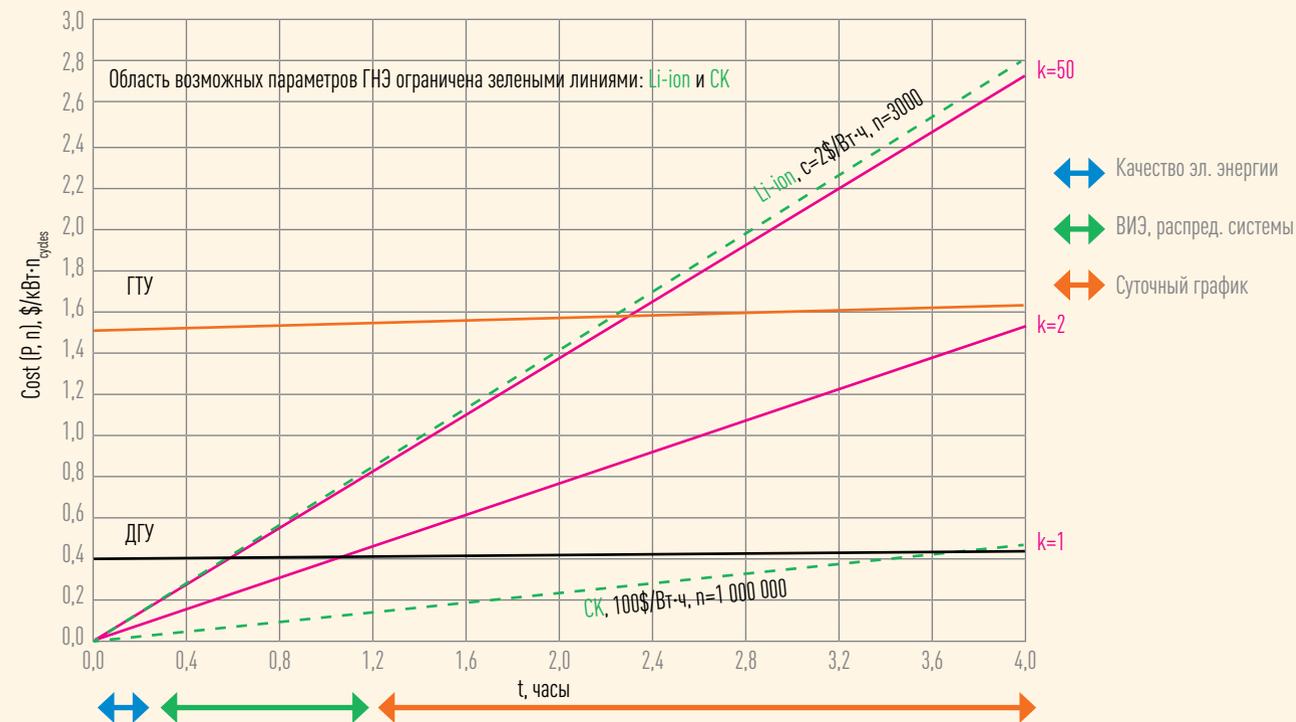


Рис. 2

Сравнение удельных стоимостей накопителей – аккумуляторных, суперконденсаторных и гибридных в зависимости от времени непрерывной работы (емкости). Линии ГТУ, ДГУ – удельные стоимости газотурбинных и дизельных генераторов с учетом топливной составляющей. Здесь параметр $k = t/t_{sc}$ – отношение максимального времени непрерывной работы накопителя (t) ко времени работы (t_{sc}) суперконденсаторной части, n – максимально возможное количество циклов заряд-разряд.

Сравнение принципов организации работы аккумуляторного и гибридного накопителей иллюстрирует рис. 1.

ПРЕИМУЩЕСТВА ГИБРИДНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ

Перейдем к анализу технико-экономических аспектов гибридной организации. На рис. 2 показана зависимость стоимости киловатта установленной мощности от времени непрерывной работы (энергоемкости) для трех типов накопителей: аккумуляторного, суперконденсаторного (две зеленые пунктирные линии) и гибридного (с различными сочетаниями энергоемкости аккумуля-

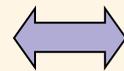
торной и суперконденсаторной частей – красные линии). На этом же графике показаны аналогичные оценки для газодизельной (ДГУ) и газотурбинной (ГТУ) электростанций. Небольшой наклон этих линий обусловлен учетом топливной составляющей (природный газ).

Как видно из рис. 2, применение накопителя на основе литий-ионных аккумуляторов является экономически оправданным при времени разряда не более одного часа в сравнении с резервной газодизельной электростанцией и не более двух часов в сравнении с резервной газотурбинной электростанцией. Аналогичные показатели для суперконденсаторного накопителя оказываются в несколько раз лучше. Последнее обусловлено значитель-

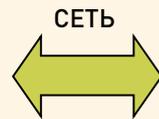
но большим ресурсом суперконденсатора. Следует, однако, учесть, что удельная энергия суперконденсатора в 20-100 раз ниже, чем у аккумулятора. Отсюда следует, что использование суперконденсаторного накопителя большой энергоемкости в большинстве случаев оказывается экономически неприемлемым. Такой накопитель оказывается слишком большим и тяжелым. На рис. 2 красными линиями показаны характеристики гибридных систем при разных степенях гибридной организации, определяемых параметром k . Степень гибридной организации позволяет оптимизировать конструкцию накопителя, варьируя его стоимость и массогабаритные характеристики в зависимости от функциональных требований к накопителю. Возможность подобной оптимизации

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА (А) И ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА (Б) ГИБРИДНОГО НАКОПИТЕЛЯ ГНЭ-100

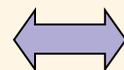
БАТАРЕЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ



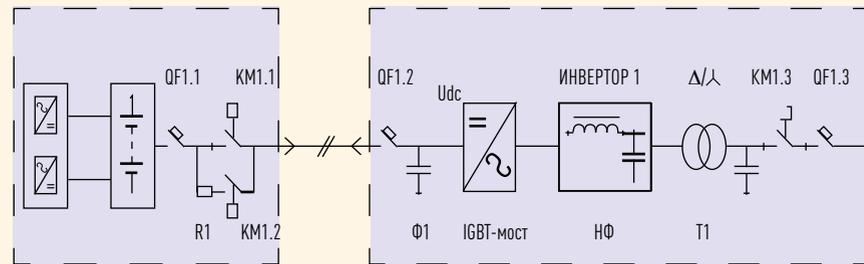
УСТРОЙСТВО СОПРЯЖЕНИЯ С СЕТЬЮ



БАТАРЕЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

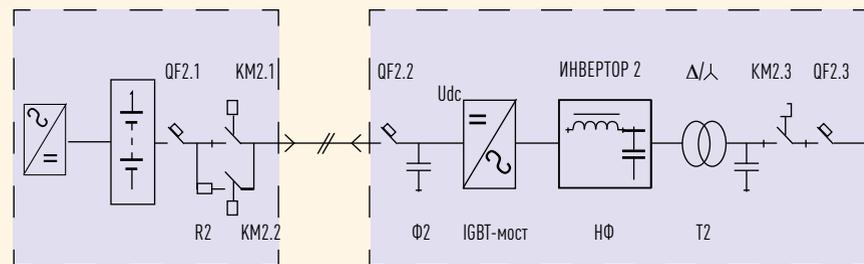


ЛИБ-100



УСС-100

БСК-100



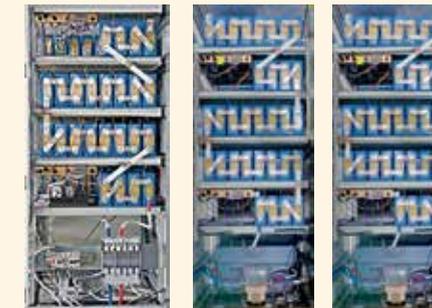
Сеть

Рис. 3

ОБЩИЙ ВИД ГИБРИДНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ГНЭ-100



БАТАРЕЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ЛИБ 100



168 АККУМУЛЯТОРОВ
(60+60+48)
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
LiFePO₄

БАТАРЕЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ БСК 100



20 СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ
МНЭ-0,93/360Б
НАПРЯЖЕНИЕ 360 В
ЕМКОСТЬ 0,93 Ф
МАССА 38 КГ

УСТРОЙСТВО СОПРЯЖЕНИЯ С СЕТЬЮ УСС 100



УСС 100 БСК ВИД БЕЗ ДВЕРЕЙ УСС 100 ЛИБ

Рис. 4

является важным преимуществом гибридной схемы.

Разработанный гибридный накопитель энергии ГНЭ-100 состоит из трех модулей (рис. 3):

- батареи литий-ионных аккумуляторов ЛИБ-100;
- батареи суперконденсаторов БСК-100;
- устройств согласования с сетью УСС-100.

Подсистема накопления включает в себя аккумуляторный накопитель энергии (в данной работе использовалась батарея на основе литий-ионных аккумуляторов системы LiFePO₄ производства ООО «НПО ССК») и суперконденсаторную часть накопителя энергии (батарея наборных суперконденсаторов производства НПО «Технокор»). Каждый из накопительных блоков содержит также отдельные системы защиты, контроля и мониторинга параметров батарей. Структурная и однолинейная схемы гибридного накопителя ГНЭ-100 представлены на рис. 3.

Гибридный накопитель ГНЭ-100 состоит из трех модулей (см. рис. 3). В батарее литий-ионных аккумуляторов ЛИБ-100 происходит накопление электроэнергии из сети в период снижения нагрузки сети ниже номинального уровня и отдачи ее в сеть. В период возрастания нагрузки выше номинального уровня эта батарея отдает запасенную электроэнергию в сеть. ЛИБ-100 дополнительно снабжена устройством интеллектуального управления, способным выполнять следующие функции:

- выравнивание напряжения на отдельных ячейках ЛИБ-100;
- коммутация модулей и их защиты по мгновенному значению тока с использованием контактора

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАКОПИТЕЛЯ ГНЭ-100

Номинальная активная мощность, кВт	100
Номинальное напряжение (3-ф, 50 Гц), кВ	380 ^{+10%} _{-15%}
Номинальный выходной фазный ток, А	152
Диапазон напряжений звена постоянного тока	430...820
Коэффициент гармоник тока сети, не более (%)	7
Энергоемкость, кВт•ч	100
Время работы с полуторакратной перегрузкой по току сети, с	до 10
Время работы с номинальной нагрузкой, ч	1,0
Диапазон регулирования реактивной мощности, кВАр	(0 ÷ 100)
Ресурс, не менее (циклов заряд-разряд)	1500
КПД в цикле заряд-разряд, не менее (%)	75
Регулировка реактивной мощности отдельно по каждой фазе, кВАр	0...33,3
Скорость обмена по RS-485, кбит/с	56
Скорость обмена по CAN, кбит/с	250
Вероятность безотказной работы за весь срок службы	0,99
Назначенный срок эксплуатации, не менее (лет)	10
Срок службы до первого капитального ремонта, не менее (лет)	5
Наработка на отказ, не менее (час)	25 000

Таблица 1

и быстродействующих предохранителей; контроль изоляции элементов.

Батарея суперконденсаторов БСК-100 предназначена для компенсации кратковременных колебаний напряжения сети и состоит из 20 суперконденсаторов, электротехнического, коммутационного и измерительного оборудования, а также из двух блоков заряда суперконденсаторов. Время автономной работы суперконденсаторной части ГНЭ-100 (заданное требованиями технического задания на разработку) составляет 10 с.

Устройство согласования с сетью УСС-100 состоит из двух одинаковых

блоков: один для работы с ЛИБ-100, другой – с БСК-100 – и представляет собой два преобразователя постоянного тока в переменный (и наоборот) с соответствующим согласованием уровней напряжений. Этот модуль обеспечивает независимое управление активной и реактивной мощностью. УСС-100 также осуществляет функции системы управления ГНЭ-100 и активного фильтра сети, что позволяет существенно улучшить качество электрической энергии за счет использования алгоритмов компенсации обратной последовательности по основной гармонике и компенсации гармоник, близких к основной (номера 5, 7, 11, 13, 17), по каждой фазе, а также стабилизировать выходной ток при возникновении перегрузки.

Общий вид опытного образца гибридного накопителя энергии ГНЭ-100 с активной мощностью накопителя 100 кВт и энергоемкостью 100 кВт•ч показан на рис. 4. Технические характеристики рассмотренных устройств приведены в таблицах 1, 2, 3 и 4.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ
СТЕНД

Для определения функциональных возможностей опытного образца гибридного накопителя мощностью не менее 100 кВт и энергоемкостью 100 кВт•ч были проведены экспериментальные исследования в условиях, приближенных к реаль-

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАТАРЕИ ЛИБ-100

Номинальная активная мощность, кВт	100
Номинальное напряжение (3-ф, 50 Гц), кВ	380 ^{+10%} _{-15%}
Энергоемкость, кВт•ч	100
Время работы в установившихся режимах с номинальной мощностью, ч	1,0
Диапазон регулирования реактивной мощности, кВАр	(-100 ÷ 100)
Ресурс, не менее (циклов заряд-разряд)	1500
КПД в цикле, не менее (%)	85
Регулировка реактивной мощности отдельно по каждой фазе, кВАр	-33.3 ÷ 33.3
Скорость обмена по RS-485, кбит/с	56
Скорость обмена по CAN, кбит/с	250
Вероятность безотказной работы за весь срок службы	0,99
Назначенный срок эксплуатации, не менее (лет)	10
Срок службы до первого капитального ремонта, не менее (лет)	5
Наработка на отказ, не менее (час)	25 000

Таблица 2

ным. Для этих работ был разработан специальный испытательный стенд, включающий автономный источник электроэнергии (газотурбинную электростанцию – ГТЭ) мощностью до 1,5 МВт, набор активных и реактивных нагрузок и необходимую коммутационную и измерительную аппаратуру. Испытательный стенд для моделирования работы опытного образца гибридного накопителя энергии состоит из следующих подсистем (рис. 5):

- газотурбинной электростанции (ГТЭ-1500) напряжением 6,3 кВ и установленной мощностью 1250 кВА, имитирующей работу сетевой электростанции;
- понижающего трансформатора 6,3 кВ/0,4 кВ;
- блока активных и реактивных тестовых нагрузок для имитации возмущений в сети в соответствии

с условиями моделирования;

- электрокалорифера мощностью 33 кВт;
- электрокалорифера мощностью 66 кВт;
- электрокалорифера мощностью 99 кВт;
- двух моторов-генераторов в режиме холостого хода мощностью 32 кВт;
- систем управления испытаниями.

Газотурбинная электростанция ГТЭ-1500 с газоснабжением от отдельной газораспределительной подстанции через дожимной компрессор смонтирована в контейнере на базе газотурбинного двигателя и электрогенератора производства ФГУП «Завод им. В.Я. Климова».

Система управления испытаниями (кроме реализации заданных возмущений сети путем включения и выключения нагрузочных

устройств) включает в себя защитно-коммутационные аппараты, предназначенные для коммутации силовых устройств, защиты их от перегрузки и токов короткого замыкания.

С помощью этого испытательного стенда исследовалась совместная работа аккумуляторной батареи и батареи суперконденсаторов в специфических условиях, налагаемых на накопительные батареи. Кроме того, была определена степень влияния компенсационных режимов работы на эффективность системы накопления в целом по гибридной и раздельным схемам, а также эффективность использования гибридной схемы накопителя при работе с сетью и потребителем электрической энергии. Следует отметить, что на основе указанных выше параметров и их граничных значений в принципе можно составить множество различных действий, необходимых при испытаниях электротехнического комплекса,

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БСК-100

Номинальное статическое напряжение заряда, кВ	0,7
Напряжение при разряде, В	380 ^{+10%} _{-15%}
Номинальная динамическая активная мощность при разряде, кВт	100
Время работы в динамическом режиме с номинальной мощностью, в диапазоне (сек)	5 ÷ 10
Ресурс, не менее (циклов заряд-разряд)	150 000
КПД в цикле, не менее (%)	85
Вероятность безотказной работы за весь срок службы	0,99
Назначенный срок эксплуатации, не менее (лет)	10
Срок службы до первого капитального ремонта, не менее (лет)	5
Наработка на отказ, не менее (час)	25 000

Таблица 3

с целью подтверждения или выявления полезных характеристик по различным критериям качества.

В ходе проведенных испытаний ГНЭ-100 были установлены особые преимущества гибридной схемы:

– ток заряда и разряда аккумуляторной батареи характеризуется плавным нарастанием и спадом (по сравнению с ее работой без суперконденсаторов), что благоприятно сказывается на системе балансировки (выравнивания напряжений) аккумуляторных элементов;

– возможность компенсации кратковременных возмущений сети без подключения аккумуляторной части. При периодическом изменении нагрузки с периодом 1, 2, 5, 10 с в диапазоне от 0 до 100 кВт обеспечивается стабилизация перетоков активной и реактивной мощности из сети с помощью суперконденсаторов. Таким образом, возмущающие воздействия нагрузки компенсируются без использования аккумуляторной части накопителя;

– возможность реализации кратковременного, форсированного

режима накопителя с выдачей мощности, в два раза превышающей номинальную.

Испытания проводились в следующих режимах работы ГНЭ:

- автономный режим работы ГНЭ на нагрузку. Этот режим предполагает работу ГНЭ на нагрузочный модуль в случае исчезновения (или отсутствия) напряжения сети переменного тока. В этом случае преобразователь ГНЭ работает в режиме источника напряжения, формируя амплитуду, частоту напряжения в локальной сети;
- компенсация возмущений мощности и частоты в электрической сети переменного тока, вносимого сбросом/набросом нагрузки. В этом режиме ГНЭ обеспечивает компенсацию возмущения, возникающего в электрической сети вследствие сброса/наброса нагрузки. Возмущение создается

посредством коммутации нагрузки. Причем система управления преобразователями настраивается таким образом, чтобы мощность, выдаваемая/потребляемая ГНЭ, компенсировала все вносимые возмущения. Целью проведения данного эксперимента является определение степени (и частотной характеристики) возможной компенсации возмущения сети. При этом контролируются амплитуда, частота и фаза электрической сети; управление реактивной мощностью. Известно, что УСС ГНЭ может выдавать от минус 100% до плюс 100% реактивной мощности. Целью проведения данного эксперимента является экспериментальное подтверждение данного факта;

– режим источника бесперебойного питания (ИБП). В данном режиме один из преобразователей используется в качестве

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСС-100

Номинальная активная мощность, кВт	100
Номинальное напряжение звена постоянного тока, В	400 -750
Коэффициент гармоник тока сети, не более (%)	7
Номинальное напряжение (3-ф, 50 Гц), кВ	380 ^{+10%} _{-15%}
Время работы с полуторакратной перегрузкой по току сети	до 10 с
Диапазон регулирования реактивной мощности, кВАр	(-33,3 ÷ 33,3)
Регулировка реактивной мощности отдельно по каждой фазе, кВАр	(-33,3 ÷ 33,3)
Скорость обмена по RS-485, кбит/с	56
Скорость обмена по CAN, кбит/с	250
Назначенный срок эксплуатации, не менее (лет)	10
Срок службы до первого капитального ремонта, не менее (лет)	5

Таблица 4

управляемого выпрямителя, осуществляющего передачу электрической мощности из сети в звено постоянного тока, к которому подключены ЛИБ-100 или БСК-100, а второй преобразователь – в режиме инвертора, который осуществляет обратное преобразование из звена постоянного тока в нагрузку. Поскольку к звену постоянного тока подключен накопительный элемент, то питание нагрузки осуществляется непрерывно в случае исчезновения или провалов напряжения питающей электрической сети. Время резервирования питания определяется емкостью накопительного элемента (ЛИБ-100 или БСК-100).

На рис. 6–9 показаны типичные экспериментальные осциллограммы, полученные в режимах компенсации накопителем возмущений мощности и частоты в сети переменного тока [5].

На графиках тока и мощности рис. 7 видно, что:

- после каждого включения/выключения нагрузки устанавливаются нулевые значения тока и мощности, что означает полную компенсацию потребления включенной нагрузкой;
- каждое включение/выключение нагрузки сопровождается всплеском тока и мощности, что определяется точностью настройки режима компенсации ГНЭ.

Как видно на рис. 8, после включения/выключения нагрузки наблюдаются всплески частоты, которые компенсируются системой компенсации частоты газотурбинной установки за время, соответствующее времени переходного процесса компенсатора ГТЭ.

На графике частоты (рис. 9) видно, что включение/выключение нагрузки не сопровождается всплеском частоты.

ИНФОРМАЦИЯ

ГИБРИДНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ

Можно предположить, что гибридное сочетание аккумуляторов и суперконденсаторов в одном накопителе может дать существенный эффект. Так, суперконденсатор без подключения аккумулятора компенсирует возмущения длительностью до нескольких десятков первых секунд. При более длительных возмущениях в действие включается аккумуляторная часть накопителя. А наличие в составе накопителя суперконденсаторной части (при параллельном с аккумулятором включении) позволяет сглаживать фронты импульсов тока и напряжения, обеспечивая тем самым снижение мгновенной мощности, отдаваемой или получаемой аккумуляторной частью накопителя.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

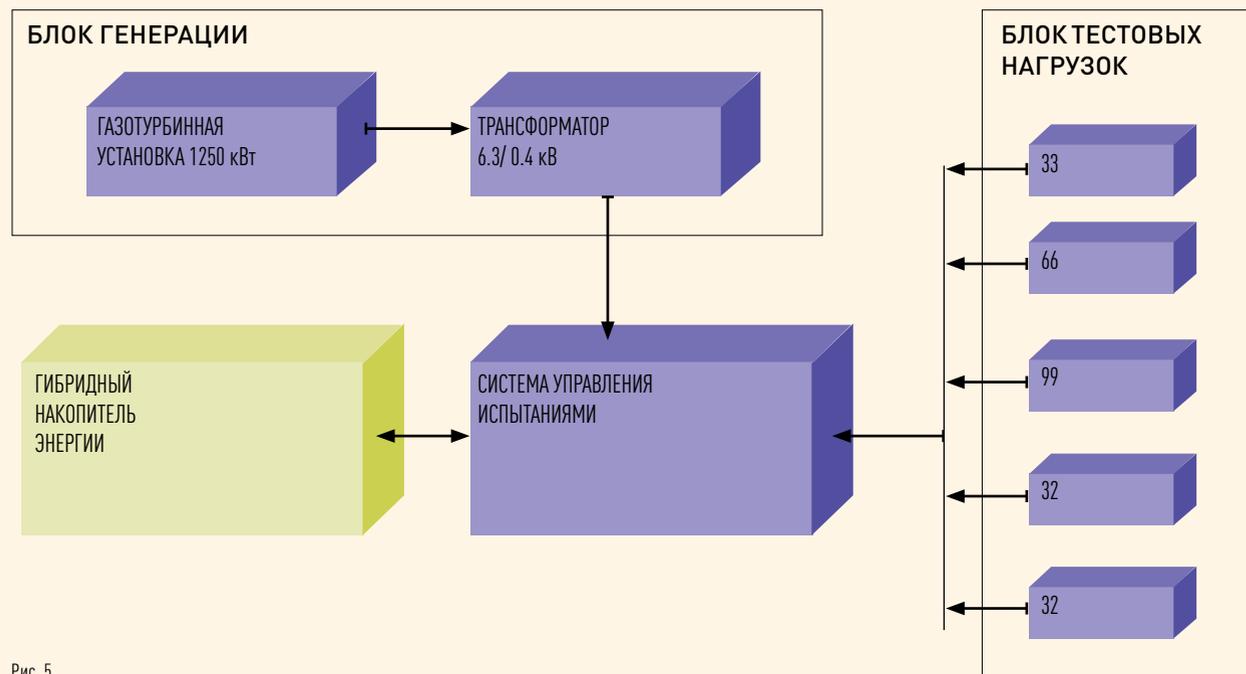


Рис. 5

Результаты проведенных испытаний показали, что [5]:

1. Разработанные программа и методика испытаний опытного образца секции ГНЭ-100 позволяют оценить технические характеристики в реальных условиях эксплуатации как изделия в целом, так и его отдельных подсистем (ЛИБ-100, БСК-100 и УСС-100).

2. При периодическом изменении нагрузки с периодом 1, 2, 5, 10 с в диапазоне от 0 до 100 кВт обеспечивается стабилизация перетоков активной и реактивной мощности из сети с помощью суперконденсаторов. Таким образом, возмущающие воздействия нагрузки компенсируются полностью.

3. При периодическом изменении нагрузки с периодом более

10 с в диапазоне от 0 до 100 кВт обеспечивается стабилизация перетоков активной и реактивной мощности из сети с помощью аккумуляторных батарей. Таким образом, возмущающие воздействия нагрузки указанного спектра компенсируются полностью.

4. При периодическом изменении нагрузки с периодом 1, 2, 5, 10, 100 с в диапазоне от 0 до 100 кВт обеспечивается стабилизация перетоков активной и реактивной мощности из сети с помощью гибридного накопителя; при этом возмущающие воздействия нагрузки высокочастотного спектра (с периодом 1–10 с) компенсируются с помощью суперконденсаторов, а возмущающие воздействия нагрузки низкочастотного спектра (с периодом более 10 с) компенсируются с помощью аккумуляторных батарей.

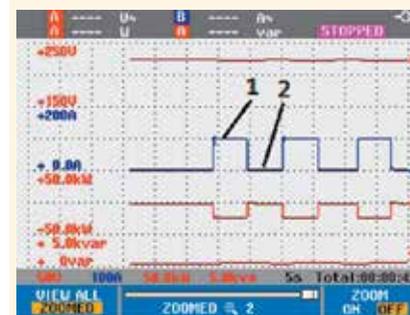
5. При отключении сети (т.е. режим источника бесперебойного питания) ГНЭ-100 обеспечивал устойчивое электроснабжение потребителя с заданным уровнем напряжения локальной нагрузки.

6. Реализованный алгоритм работы ГНЭ-100 обеспечивает рекуперативный режим работы: компенсация возмущений происходит за счет заряда суперконденсаторной батареи во время сброса нагрузки.

7. ГНЭ-100 обеспечивает режим кратковременного двукратного увеличения максимальной мощности путем параллельной работы батарей аккумуляторов и суперконденсаторов.

Основные результаты данной работы формулируются следующим образом:

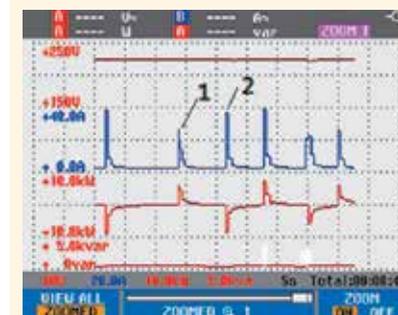
РЕЖИМ ОТСУТСТВИЯ КОМПЕНСАЦИИ МОЩНОСТИ



1 – интервал включенной нагрузки;
2 – интервал выключенной нагрузки. При включенной нагрузке ток равен 100 А, при выключенной нагрузке ток нулевой. При включенной нагрузке мощность – 25 кВт (потребление), при выключенной нагрузке мощность 0 кВт (потребления нет)

Рис. 6

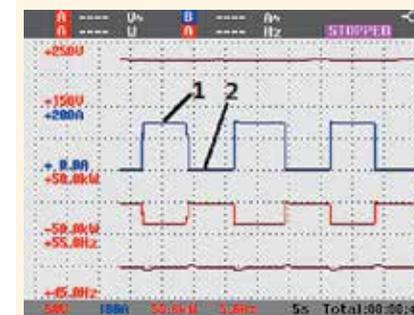
РЕЖИМ ПОЛНОЙ КОМПЕНСАЦИИ МОЩНОСТИ



1 – выключение нагрузки;
2 – включение нагрузки

Рис. 7

РЕЖИМ ОТСУТСТВИЯ КОМПЕНСАЦИИ ЧАСТОТЫ



1 – интервал включенной нагрузки;
2 – интервал выключенной нагрузки. При включенной нагрузке ток равен 100 А, при выключенной нагрузке ток нулевой. При включенной нагрузке мощность – 25 кВт (потребление), при выключенной нагрузке мощность 0 кВт (потребления нет)

Рис. 8

1. Предложен новый подход в создании гибридного накопителя, построенного на комбинации аккумуляторной батареи и батареи суперконденсаторов.

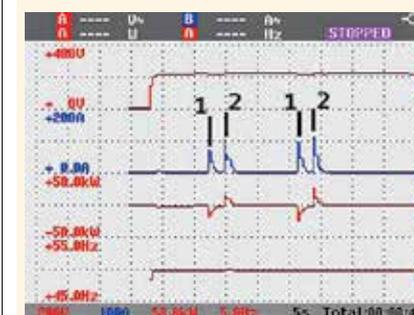
2. Разработан и испытан в условиях, близких к реальным, опытный образец гибридного накопителя ГНЭ-100 номинальной мощностью 100 кВт и энергоемкостью 100 кВт•ч.

ЛИТЕРАТУРА

- Susan M. Schoenung and William Hassenzahl. Long vs. Short-Term Energy Storage: Sensitivity Analysis. A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. SAND REPORT. SAND 2007–4253. Unlimited Release. Printed July 2007.
- Прохоров И. Ю., Акимов Г. Я., Радионова О. И. Твердые катионные электролиты и метаноловая энергетика / Наука

- та інновації, 2011, т. 7, № 6. –17–32 с. Benjamin L. Norris, Jeff Newmiller, Georgianne Peek. NAS® Battery Demonstration at American Electric Power. A Study for the DOE Energy Storage Program. SANDIA REPORT. SAND 2006–6740. Unlimited Release. Printed March 2007.
- Жук А. З., Клейменов Б. В., Форттов В. Е., Шейндлин А. Е. Электромобиль на алюминиевом топливе. – М.: Наука, 2012. – 171 с.
- Научно-техническая и проектная документация по теме «Разработка гибридного накопителя электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов». ОИВТ РАН – Форттов В. Е., Сон Э. Е., Жук А. З., Денещиков К. К. ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» – Шакарян Ю. Г., Новиков Н. Л. ООО «НПО «ССК» – Колесников В. А., Ворошилов А. Н., Жораев Т. Ю. ЗАО «НПО «Технокор» – Голиков М. В., Герасимов А. Ф., Сергиенков С. П. ООО «НПП «СПТ» – Барзуков С. Н., Шигапов Д. А., Полников И. Г.

РЕЖИМ ПОЛНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЧАСТОТЫ



1 – выключение нагрузки;
2 – включение нагрузки

Рис. 9