

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

АВТОРЫ:

В.М. ЗЫРЯНОВ,
ФГБОУ ВО
«НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Н.Г. КИРЬЯНОВА,
ФГБОУ ВО
«НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Г.Б. НЕСТЕРЕНКО,
ФГБОУ ВО
«НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»,
ТИК ООО «СИСТЕМЫ
НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ»

Г.А. ПРАНКЕВИЧ
ФГБОУ ВО
«НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»,
ТИК ООО «СИСТЕМЫ
НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ»

А.М. ПОТАПЕНКО,
ТИК ООО «СИСТЕМЫ
НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ»

Интерес к накопителям электроэнергии значительно возрос в последнее время в связи с активизацией работ по созданию интеллектуальных электроэнергетических систем, в которых эти устройства являются ключевыми элементами.

Ключевые слова: гибридная система накопления электрической энергии; суперконденсаторы; литий-ионные аккумуляторы; выбор параметров; резкопеременная нагрузка.



Преобразовательный модуль
100 кВА

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время системы накопления электрической энергии (СНЭЭ) широко применяются для решения различных задач электроэнергетики. В соответствии с исследованием компании Bloomberg New Energy Finance “Energy storage forecast 2016–2030” [1] к 2030 г. суммарная установленная мощность СНЭЭ в мире составит 125 ГВт. В последние десятилетия интенсивное развитие технологий накопления энергии привело к созданию СНЭЭ с такими характеристиками (мощность, энергоёмкость, КПД, быстродействие), которые позволяют реализовывать проекты, обладающие не только технической, но и экономической эффективностью. В 2017 г. Министерством энергетики РФ утверждена Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации [2]. Кроме того, конкретные задачи по внедрению систем накопления электроэнергии в энергетический комплекс страны обозначены в Дорожной карте «Энерджинет», являющейся частью долгосрочной комплексной программы Национальной технологической инициативы [3].

Современные быстродействующие СНЭЭ являются принципиально новыми энергетическими силовыми устройствами, предназначенными для управляемого энергообмена с энергосистемой с целью организации желаемого режима или для управления динамическими процессами. Ключевые слова в этой формулировке — «управляемый энергообмен». Достаточно широко распространено мнение, согласно которому роль СНЭЭ в энергосистеме сводится лишь к роли источника бесперебойного питания. Но в действительности это лишь одна (причем далеко не основная) из функций, которые способна выполнять СНЭЭ. Накапливая энергию при ее избытке в энергосистеме,

сохраняя в течение достаточно длительного времени с приемлемым уровнем потерь и возвращая в нужный момент в энергосистему, СНЭЭ способна практически безынерционно управлять балансом активной мощности по любому заданному алгоритму в соответствии с решаемой задачей. Кроме того, СНЭЭ может быть использована для компенсации реактивной мощности, в качестве активного фильтра высших гармоник и как средство компенсации несимметрии в трехфазных сетях. Учитывая multifunctionality и быстродействие систем накопления, можно рассчитывать, что при широком внедрении в электроэнергетику и при достижении значений мощности и энергоёмкости систем накопления, актуальных для ЕЭС, многие задачи регулирования и управления, в том числе противоаварийного, могут решаться с помощью СНЭЭ.

Возможны различные сценарии применения СНЭЭ в объединенных, изолированных и автономных энергосистемах.

К автономным энергосистемам целесообразно относить изолированные энергосистемы, если в составе их потребителей есть хотя бы один потребитель, имеющий номинальную мощность, соизмеримую с мощностью всего генерирующего оборудования. Коммутации таких потребителей и изменения их режима работы способны приводить к глубоким, нередко критическим, колебаниям режимных параметров энергосистемы даже в нормальных технологических условиях эксплуатации. Примерами таких энергосистем могут служить автономные системы электроснабжения промышленных предприятий, объектов строительства, нефтегазовой отрасли, судовые энергосистемы и многие другие объекты, имеющие собственные электростанции.

В силу новизны технологий СНЭЭ их освоение и внедрение в практику российской электроэнергетики начинается с относительно малых мощностей и энергоёмкостей. В настоящее время в РФ реализуется ряд проектов со СНЭЭ в автономных энергосистемах, которые характеризуются высокой экономической и технической эффективностью.

Позитивный опыт реализации вышеупомянутых проектов позволит приступить к разработке более масштабных проектов по применению СНЭЭ, в том числе на объектах ЕЭС России. Оценка их эффективности и целесообразности применения в ЕЭС и высоковольтных изолированных энергосистемах требует детальной проработки в каждом рассматриваемом случае при условии надежности и экономической доступности технологий.

Скорость, с которой должна изменяться мощность в процессе управляемого энергообмена, определяется функциональным назначением СНЭЭ. В настоящее время наиболее актуальными типами накопителей электроэнергии являются литий-ионные аккумуляторы и суперконденсаторы. Для относительно медленных процессов наиболее эффективен первый тип, для более быстрых — второй. В случае необходимости управлять и быстрыми, и медленными процессами целесообразно применять гибридную СНЭЭ, в состав которой включены оба типа накопителей электроэнергии.

Один из основных вопросов, подлежащих решению при проектировании гибридной СНЭЭ, — выбор параметров каждого из накопителей электроэнергии. В статье излагается подход к выбору параметров аккумуляторов и суперконденсаторов для гибридной СНЭЭ, основанный на анализе нагрузочных диаграмм.

СОСТАВ И СТРУКТУРА СНЭЭ

Структура СНЭЭ на базе аккумуляторов и суперконденсаторов и ее основные подсистемы представлены на рис. 1.

Подсистемами СНЭЭ являются:

- Подсистема накопления энергии. Комплектуется аккумуляторными батареями и батареями суперконденсаторов. Управление процессом заряда / разряда,

- мониторинг состояния элементов, балансировка осуществляются системой BMS (Battery management system).
- Подсистема преобразования. Осуществляет преобразование напряжения постоянного тока (подсистемы накопления энергии) в напряжение переменного тока и обратно. Основным элементом подсистемы — реверсивный преобразователь AC / DC, имеющий собственную подсистему управления, которая обеспечивает настройку, согласование работы с другими

- подсистемами, управляющие воздействия для реализации заданных алгоритмов.
- Подсистема распределения. Имеет в составе коммутационные аппараты, согласующие трансформаторы, аппараты релейной защиты. Мониторинг и управление входящими в состав подсистемы распределения элементами организованы через цифровые интерфейсы и дискретные сигналы от подсистемы управления.
- Подсистема управления. Обеспечивает совместную работу всех упомянутых подсистем, реализацию требуемых алгоритмов работы, настройку СНЭЭ, мониторинг, двусторонний информационный обмен с системами среднего и верхнего уровней (системами управления другого оборудования, АСУ, SCADA, РДУ и т.д.). В состав подсистемы входит экспертная система самодиагностики, выдающая сигналы о состоянии СНЭЭ в целом и ее составляющих с указанием единичных неисправных элементов и рекомендациями по их техническому обслуживанию.

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Сопоставим энергетические характеристики аккумулирующих элементов двух вариантов подсистемы накопления СНЭЭ: на литий-ионных аккумуляторах (ЛИА) и на суперконденсаторах (СК).

В гибридной СНЭЭ для каждой подсистемы накопления энергии должны использоваться индивидуальные реверсивные преобразователи, учитывающие особенности их аккумулирующих элементов. Разработка реверсивного преобразователя

и компоновка подсистем накопления выходят за рамки настоящей статьи, поэтому ниже рассматриваются только энергетические характеристики единичных аккумулирующих элементов СК и ЛИА.

Параметры единичных аккумулирующих элементов СК и ЛИА приведены в табл. 1 и 2 соответственно и дополняются разрядной характеристикой ЛИА, представленной на рис. 2.

НОМИНАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ И ЭНЕРГОЕМКОСТЬ СНЭЭ

Два основных параметра СНЭЭ любого типа — номинальная мощность и номинальная энергоемкость. Первый параметр определяет значение мощности, на которое рассчитаны все силовые элементы СНЭЭ. Второй параметр требует дополнительных пояснений.

Количество энергии, которое может быть запасено в подсистеме накопления при заданных значениях напряжения на стороне постоянного тока подсистемы преобразования, определяется параметрами накопителей электроэнергии — ЛИА или СК. Это количество энергии — полная энергоемкость подсистемы накопления СНЭЭ (E_n). Если пренебречь очевидными физическими ограничениями, то в процессе энергообмена аккумулирующие элементы СНЭЭ теоретически могут полностью (в пределах полной энергоемкости) заряжаться и разряжаться.

Но, во-первых, при соблюдении технологических ограничений, обусловленных в том числе и характеристиками подсистем распределения и преобразования, в процессе

РАЗРЯДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛИА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТОКА РАЗРЯДА

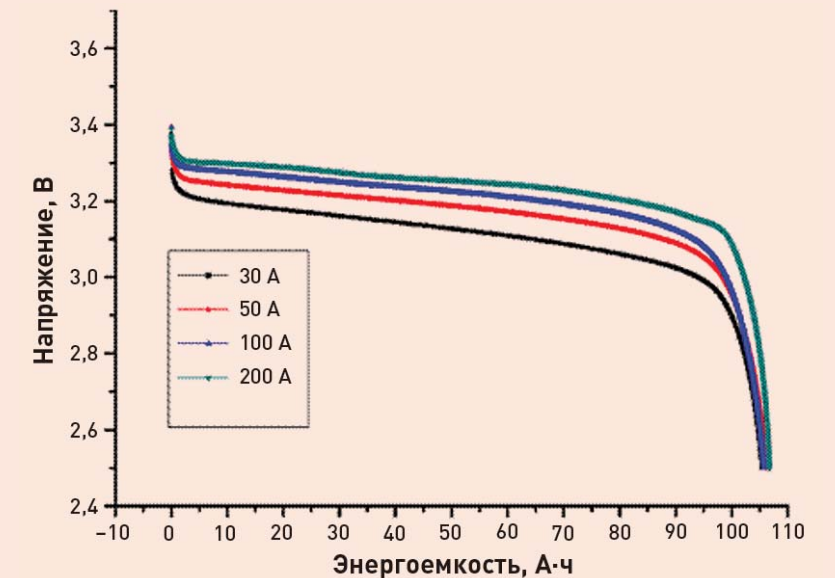


Рис. 2

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДУЛЯ СК [4]

Рабочее напряжение	151,2 В
Максимальное напряжение	159,6 В
Электрическая емкость	53,5 Ф
Максимальное эквивалентное сопротивление	10,2 мОм
Рабочий ток (для режима непрерывных циклических нагрузок)	200 А

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АККУМУЛЯТОРА ЛИА [5]

Номинальное напряжение	3,2 В
Максимальное напряжение	3,4 В
Номинальная емкость, С	100 А·ч
Максимальный длительный ток заряда	300 А
Максимальный длительный ток разряда	300 А

Таблица 2

СТРУКТУРА ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

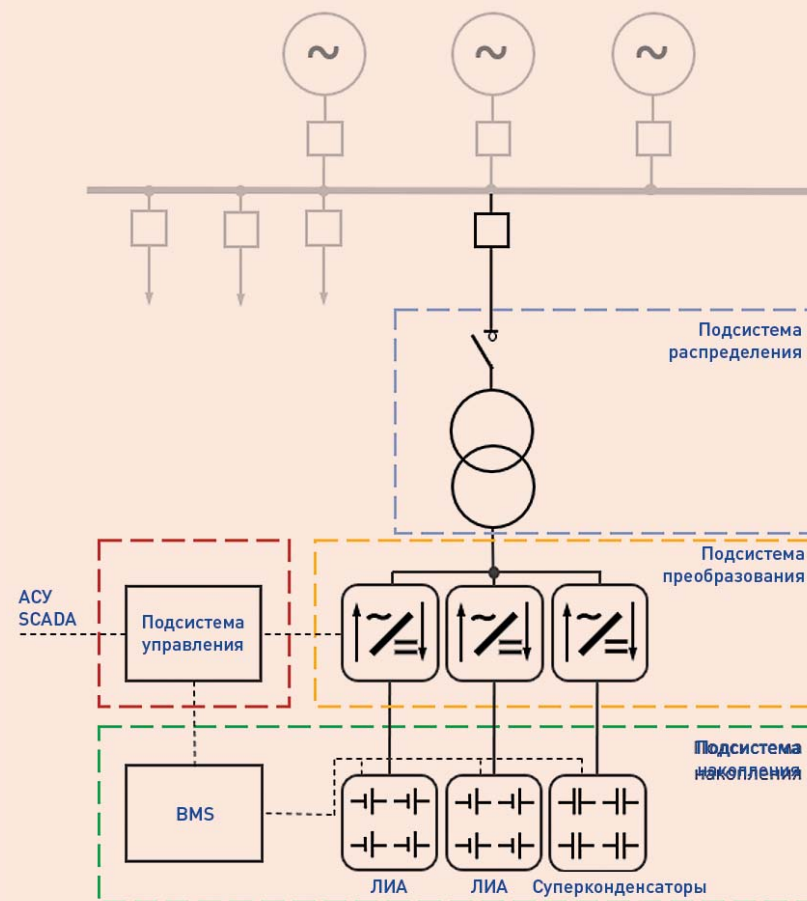


Рис. 1

заряда и разряда невозможно за- действовать в энергообмене полную емкость.

Во-вторых, от глубины разряда¹ в процессе отработки циклов заряд / разряд зависит срок службы аккумуляющих элементов. Если для СК, учитывая их способность выдерживать большое количество полных циклов заряд / разряд (не менее 500 000), глубина циклов не столь актуальна, то для ЛИА при глубине разряда 80 % число циклов составляет 3000–4000, после чего структура аккумуляторов необратимо деградирует [6]. Для управления СНЭ необходимо знать, какое наибольшее количество энергии из общего объема можно использовать для обмена с энергосистемой. Этот объем энергии целесообразно определить термином «доступная для обмена энергоемкость» ($E_{д.обм}$), обозначая таким образом то максимальное количество энергии, которое может быть использовано при обмене энергией между СНЭ и энергосистемой и рассчитывается с учетом всех ограничений и особенностей работы подсистем накопления и преобразования энергии.

Энергия, запасенная в суперконденсаторе, определяется выражением:

$$E = C \cdot U^2 / 2,$$

где C — электрическая емкость суперконденсатора, Ф; U — напряжение на зажимах суперконденсатора, В.

Для накопителей на базе СК величина энергии, которую можно использовать для энергообмена с энергосистемой, зависит от рабочего диапазона напряжения на стороне постоянного тока реверсивного преобразователя. Если принять соотношение минимального и максимального рабочих напряжений равным 0,6 [7], то, учитывая не-

ПОДСИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ 1200 кВА



Рис. 3а

ШКАФ ПОДСИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ 400 кВА



Рис. 3б

линейность зависимости запасенной энергии в СК от напряжения, при таком соотношении минимального и максимального рабочего напряжения на стороне постоянного тока преобразователя СНЭ может использоваться для обмена с энергосистемой 64 % от номинальной энергоемкости модуля СК.

С учетом вышесказанного обменная энергоемкость для модуля СК определяется выражением:

$$E_{д.обм} = 0,64 \cdot \frac{c \cdot U_{раб.СК}^2}{2} = 0,391 \text{ МДж} = 0,109 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где c — электрическая емкость модуля СК, Ф; $U_{раб.СК}$ — рабочее напряжение модуля СК, В.

В нормальном режиме работы ЛИА его уровень заряда не должен быть меньше 10 % и больше 90 % [8]. Ввиду этой особенности величина доступной для обмена энергоем-

¹ Под глубиной разряда понимается отношение количества энергии в конце процесса разряда к полной энергоемкости накопителя электроэнергии.

кости единичного элемента ЛИА равна:

$$E_{д.обм} = 0,8 \cdot U_{ЛИА ном} \cdot C = 256 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где C — емкость единичного аккумуляторного модуля, а $U_{ЛИА ном}$ — номинальное напряжение единичного аккумуляторного модуля, В.

РАСПОЛАГАЕМАЯ МОЩНОСТЬ СНЭ

В процессе энергообмена степень заряда подсистемы накопления непрерывно изменяется, что в свою очередь приводит к изменению максимального значения мощности, которую способна потреблять / отдавать СНЭ в режиме заряда / разряда.

Это значение мощности является располагаемой мощностью. В процессе управления мощность СНЭ может принимать любые значения в диапазоне от 0 до величины располагаемой мощности, причем сама располагаемая мощность непрерывно изменяется при изменении степени заряда. Степень заряда определяется как отношение фактического количества энергии в подсистеме хранения $E_{ф}$ к ее полной энергоемкости E_n :

$$k_z = \frac{E_{ф}}{E_n} \cdot 100 \%,$$

Следует учитывать, что значения располагаемой мощности на потребление и выдачу в общем случае отличаются друг от друга.

Характеристика располагаемой мощности модуля СК в зависимости от степени заряда представлена на рис. 4, при этом учитывается ограничение по минимальному напряжению на стороне постоянного тока преобразователя. Располагаемая мощность ветви меняется не-

линейно в диапазоне 18,2–30,2 кВт. Таким образом, минимальное значение располагаемой мощности модуля СК составляет 18,2 кВт, максимальное — 30,2 кВт.

Зависимость располагаемой мощности единичного аккумулятора ЛИА строится аналогичным образом за исключением некоторых особенностей. Для ЛИА задаются максимальный длительный ток заряда и максимальный длительный ток разряда. В рассматриваемом примере они равны между собой и соответствуют значению $3C$, где C — номинальная емкость ЛИА (100 А·ч). Значение тока в амперах составит:

$$I_{3C} = 3 \cdot C = 3 \cdot 100 = 300 \text{ А}.$$

При расчете располагаемой мощности для одного элемента ЛИА необ-

ходимо помнить, что для нормальной эксплуатации степень заряда должна находиться в диапазоне 10–90 %. С учетом этого построена зависимость располагаемой мощности ЛИА от степени заряда (рис. 5 на с. 40).

Из этой зависимости следует, что в допустимом диапазоне изменения степени заряда располагаемая мощность меняется незначительно и практически линейно. При этом минимальная располагаемая мощность при $k_z = 10 \%$ составляет 1019 Вт. Максимальная располагаемая мощность при $k_z = 90 \%$ составляет 1044 Вт. Максимальная располагаемая мощность модуля больше минимальной на 2,4 %.

Комбинация различных технологий накопления энергии в гибридных системах позволяет создавать

ЗАВИСИМОСТЬ РАСПОЛАГАЕМОЙ МОЩНОСТИ МОДУЛЯ СК ОТ СТЕПЕНИ ЗАРЯДА

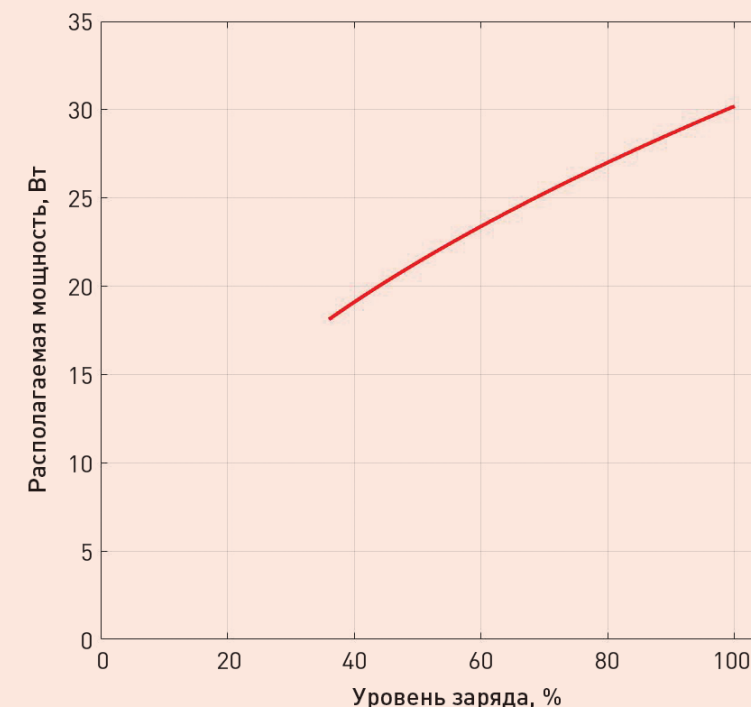


Рис. 4

более совершенные системы накопления электрической энергии для решения широкого круга задач. В составе гибридных СНЭЭ целесообразно объединять технологии, способные дополнять и взаимно компенсировать негативные особенности характеристик друг друга [9]. В случае применения в гибридной СНЭЭ подсистемы накопления на базе СК и ЛИА удачно сочетаются высокий ресурс СК по количеству рабочих циклов и меньшая стоимость ЛИА. В настоящее время гибридные СНЭЭ используются в области microgrids в комбинации с возобновляемыми источниками энергии [10] при эксплуатации электромобилей и в составе зарядных станций [11].

При расчете параметров гибридной СНЭЭ необходимо выбрать и согласовать мощности и энергоемкости обеих подсистем накопления энергии. Кроме того, требуется решить вопрос о распределении объемов участия в управлении энергообменом СНЭЭ с энергосистемой между подсистемами накопления. Один из способов распределения мощности энергообмена в гибридной СНЭЭ — линейная фильтрация [12]. Управляющие воздействия на разные типы подсистем накопления в этом случае формируются с использованием фильтров, распределяющих мощность между накопителями в зависимости от их времени отклика. Низкочастотные возмущения «назначаются» подсистеме накопления на базе ЛИА, возмущения большей частоты — на базе СК.

РАСЧЕТ ГИБРИДНОЙ СНЭЭ

Расчет параметров гибридной СНЭЭ иллюстрируется на примере автономной энергосистемы подъемного крана с дизель-генераторной установкой (ДГУ) номинальной

ЗАВИСИМОСТЬ РАСПОЛАГАЕМОЙ МОЩНОСТИ ЕДИНИЧНОГО АККУМУЛЯТОРА ЛИА ОТ СТЕПЕНИ ЗАРЯДА

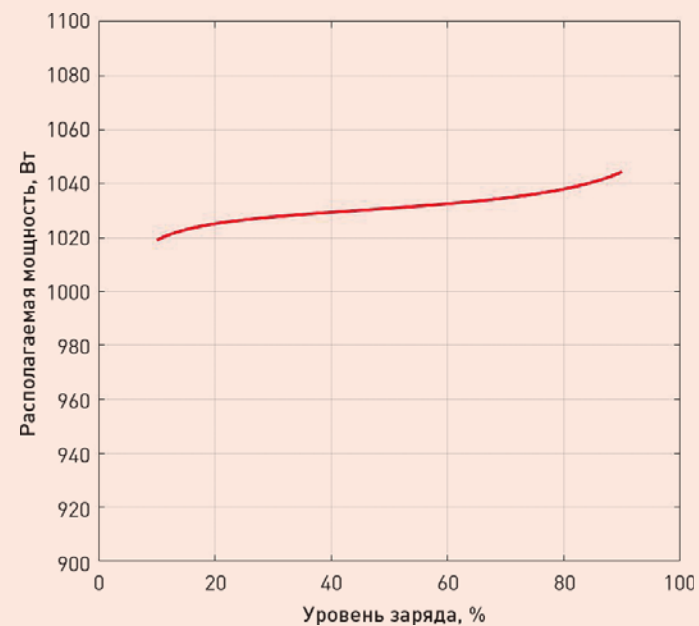


Рис. 5

мощностью 300 кВт. Особенностью работы крана является резкопеременный график нагрузки с низким коэффициентом использования установленной мощности ДГУ. Характерный пример графика нагрузки ДГУ приведен на рис. 6. Как следует из графика, мощность ДГУ изменяется в широком диапазоне, при этом ее среднее значение составляет 66,7 кВт. Резкопеременный характер нагрузки приводит к увеличенному расходу дизельного топлива и снижает моторесурс ДГУ [13].

Включение в состав электростанции СНЭЭ позволяет заменить ДГУ мощностью 300 кВт на ДГУ мощностью 100 кВт, при этом значительная часть переменной составляющей нагрузочной диаграммы должна компенсироваться системой накопления. Поскольку

нагрузочная диаграмма содержит широкий спектр частот, целесообразно применять гибридную СНЭЭ, возложив обработку относительно низкочастотной части спектра диаграммы и ограничение отклонений мощности ДГУ от заданного среднего значения на подсистему накопления на базе ЛИА, а относительно высокочастотной — на подсистему на базе СК. Это связано с тем, что для решения задач ограничения мощности и выравнивания основной части графика нагрузки необходима большая энергоемкость, чем для компенсации колебаний мощности более высокой частоты. Кроме того, необходимо учитывать, что стоимость СК существенно выше ЛИА.

Для реализации вышесказанного для подсистемы накопления на базе

ЛИА заданы следующие условия работы: при превышении мощностью нагрузки значения 86,6 кВт или снижении до значения менее 46,6 кВт подсистема накопления на базе ЛИА компенсирует разницу между мощностью нагрузки и указанными ограничениями мощности. При этом мощность ДГУ не должна выходить за пределы коридора, ограниченного этими значениями мощности. На СК предлагается возложить задачу демпфирования частот колебания мощности в диапазоне 0,4–2 Гц, которые совпадают с собственной частотой колебаний генераторного агрегата [14].

Как показано в работе Н.Г. Кирьяновой и соавторов [15], частоты периодического изменения мощности выше 2 Гц не оказывают существенного влияния на генерирующие агрегаты в силу их инерционности, а с частотами меньше 0,4 Гц достаточно эффективно справляются регуляторы скорости генерирующих агрегатов.

Параметры для гибридной СНЭЭ каждой из подсистем накопления энергии выбираются по методике, изложенной в статье В.М. Зырянова и соавторов [16]. Выбраны следующие параметры: для ЛИА — мощность 150 кВт, обменная энергоемкость 0,4 кВт·ч, для СК — мощность 40 кВт, обменная энергоемкость 0,06 кВт·ч. Под обменной энергоемкостью понимается то минимальное количество энергии, которым СНЭЭ должна обмениваться с энергосистемой в процессе управления мощностью.

Для обеспечения таких параметров гибридная СНЭЭ должна содержать следующее количество аккумулирующих элементов (модулей) в подсистемах накопления: для ЛИА — 148 шт., для СК — 2 шт. Количество этих элементов приведено только с точки зрения необходимости покрытия энерге-

тических нужд решаемой задачи. При проектировании преобразовательной части гибридной СНЭЭ эти значения могут быть скорректированы в большую сторону для обеспечения работы самого преобразователя в зависимости от его характеристик.

В табл. 3 на с. 42 приведены параметры подсистем накопления (в том числе массогабаритные) для расчетного случая.

РАСЧЕТНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

С использованием разработанной авторами математической модели СНЭЭ [17] выполнены расчеты работы автономной электростан-

ции подъемного крана совместно с гибридной СНЭЭ. На рис. 7 на с. 42 показана мощность нагрузки и мощность ДГУ, а также показано среднее значение мощности нагрузки. Как следует из рисунка, гибридная СНЭЭ вполне удовлетворительно выполнила поставленную задачу. Участие каждой подсистемы накопления СНЭЭ в управлении мощностью представлено на рис. 8 на с. 43.

Результаты расчетов показывают высокую эффективность управления мощностью с помощью гибридной СНЭЭ. Основное участие в управлении в рассматриваемом примере принимает подсистема накопления на базе ЛИА. На долю подсистемы на базе СК приходится отработка резких изменений мощности с большими значениями dP/dt .

ФРАГМЕНТ ГРАФИКА НАГРУЗКИ ДГУ ПОДЪЕМНОГО КРАНА

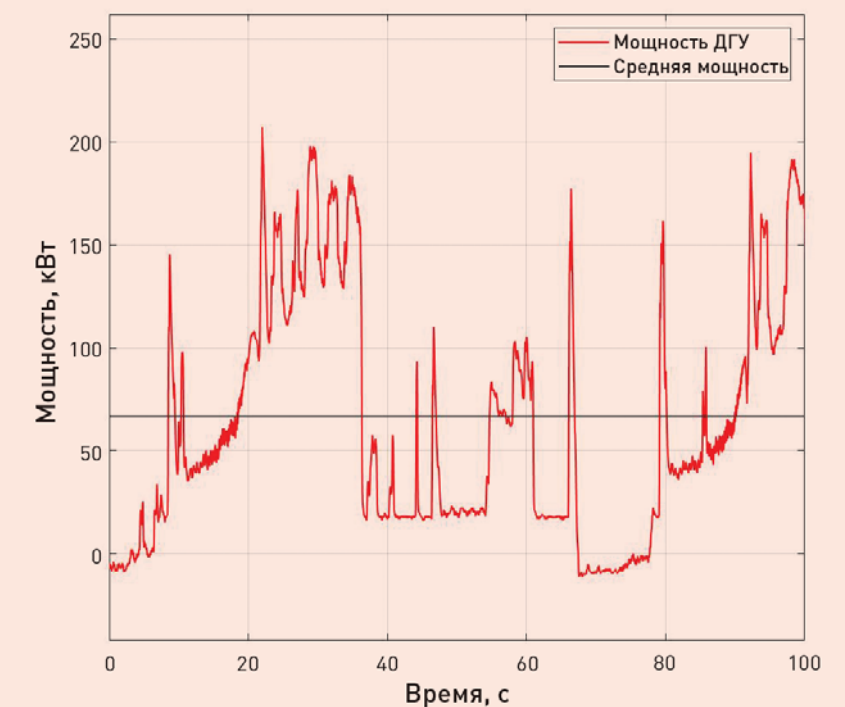


Рис. 6

В рассматриваемом примере при выборе параметров подсистем накопления не учитывались экономические вопросы. В то же время с учетом значительной разницы стоимости модулей ЛИА и СК задача эта становится технико-экономической. Необходимо учитывать допустимую глубину разряда и срок службы каждой из подсистем, а так как это связано с выбором их энергоемкости, то следует оптимизировать стоимость гибридной СНЭЭ при условии получения заданного технического эффекта.

Выводы

Основная задача, которую необходимо решать при выборе параметров гибридной СНЭЭ, — согласование доли участия каждой из подсистем накопления энергии в общем энергообмене СНЭЭ с энергосистемой. В процессе согласования необходимо учитывать ресурс аккумулирующих элементов каждой подсистемы накопления по количеству циклов заряд / разряд, допустимую глубину разряда, количество и компоновку элементов, их стоимость, т.е. в полном виде такая задача является технико-экономической.

Представленный в статье вариант расчета параметров гибридной СНЭЭ освещает техническую сторону вопроса и показывает на конкретном примере автономной энергосистемы процедуру выбора параметров и согласования объемов участия различных типов подсистем накопления в процессе энергообмена. Рассмотренный вариант СНЭЭ сочетает достоинства обоих типов подсистем накопления: быстрдействие суперконденсаторов и их высокий ресурс по количеству рабочих циклов с одной стороны и большую энергоемкость при меньшей стоимости литий-ионных аккумуляторов — с другой.

ПАРАМЕТРЫ ПОДСИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЛИА И СК ДЛЯ ГИБРИДНОЙ СНЭЭ

Параметр	ЛИА	СК
Полная энергоемкость, кВт·ч	47,36	0,79
Доступная для обмена энергоемкость, кВт·ч	37,89	0,51
Диапазон располагаемой мощности, кВт	150,8–154,5	54,6–90,6
Объем элементов накопления, куб. м	0,29	0,132
Масса элементов накопления, кг	414,4	156
Количество циклов заряд / разряд при максимально возможной глубине разряда	~ 3000	~ 1 000 000

Таблица 3

РАСЧЕТНАЯ ОСЦИЛЛОГРАММА МОЩНОСТЕЙ НАГРУЗКИ И ДГУ ПРИ УЧАСТИИ В РАБОТЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ГИБРИДНОЙ СНЭЭ

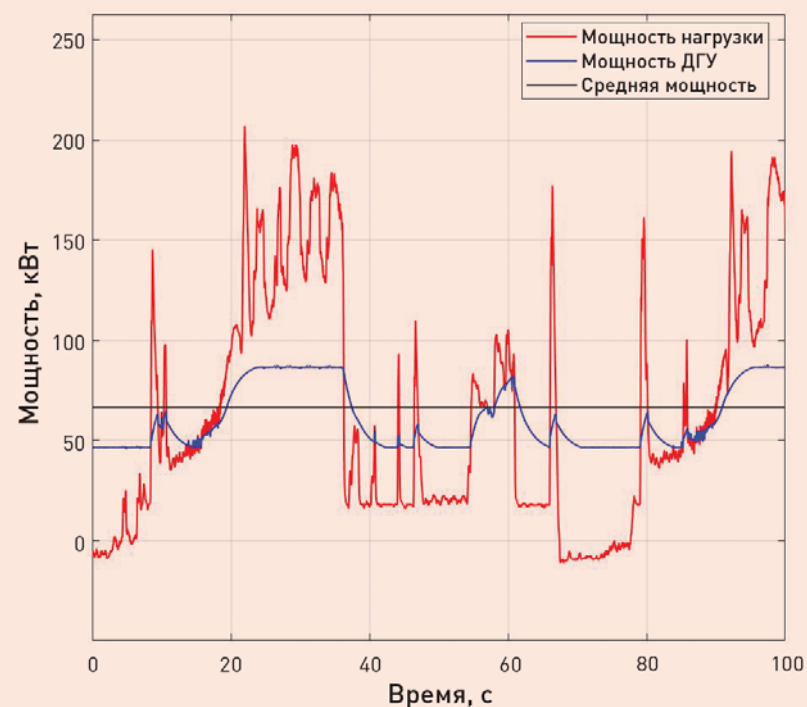


Рис. 7

ЛИТЕРАТУРА

- Energy storage forecast 2016–2030 // Bloomberg New Energy Finance. Nov. 20, 2017.
- Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации. Министерство энергетики Российской Федерации. 2017.
- План мероприятий («Дорожная карта») «Энерджинет» Национальной технологической инициативы. Одобрено Президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России 28.09.2016. Протокол № 4.
- ИБП и сетевые накопители: MO — 150V53F — 0. Компания «ТЭЭМП». [Электронный ресурс]. URL: <http://teemp.ru/products/ehnergetika/setevye-nakopiteli/mo-150v53f-0/> (дата обращения: 01.11.2018).
- Specification of LiFePO4 Prismatic Module: 3.2V 100Ah, 3C Rate (320Wh). USA: AA Portable Power Corp, 2010. 4 p.
- Ворошилов А., Петров А., Чудинов Е. Литий-железо-фосфатная аккумуляторная батарея. Моделирование режима зарядки // Новости ЭлектроТехники, 2017. № 2(104)–3(105). С. 44–49.
- Преобразователь напряжения двунаправленный производства ООО «СПТ»: каталог. Новосибирск: ООО «Системы постоянного тока», 2018. 2 с.
- ГОСТ Р 58092.1 – 2018. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Термины и определения. Введен 01.03.2019. М.: Стандартинформ, 2018. 54 с.
- Dulout J., Jammes B., Séguier L., Alonso C. Control and design of a hybrid energy storage system. EPE – ECCE Europe. 15 Sep. 2015. Geneva, Switzerland. DOI: 10.1109/EPE.2015.7309468.
- A SC-battery Hybrid Energy Storage System in the Microgrid / J. Li, B. Cornelusse, Ph. Vanderbemden, D. Ernst // Energy Procedia. Vol. 142. December 2017. Pp. 3697–3702. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.264.
- The Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicle Applications: A Case Study / Z. Songa, J. Lib, J. Hou, H. Hofmann, M. Ouyang, J. Du // Energy. No. 154. 2018. Pp. 433–441. DOI: 10.1016/j.energy.2018.04.148.
- A Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System Design and Power Management // V.G. Chirkin, L.Y. Lezhnev, D.A. Petrichenko, I.A. Papkin // International Journal of Pure and Applied Mathematics. Vol. 119. No. 15. 2018, 2621–2625.
- Эффективность применения накопителей энергии в автономных энергосистемах с резкопеременной нагрузкой / В.А. Алемасов, Д.И. Баранов, М.Д. Бимуханов, В.М. Зырянов, А.Б. Мосиенко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2007. № 2. С. 113–120.
- Применение накопителя энергии для демпфирования колебаний мощности в автономных энергосистемах / Д.Ю. Балувев, В.М. Зырянов, Н.Г. Кирьянова, Г.А. Пранкевич // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. Сб. материалов 18 Всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск, 12 мая — 6 июня 2017 г. Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2017. С. 181–187.
- Energy storage device application for load oscillations damping in isolated power systems / N.G. Kiryanova, D.Y. Baluev, G.A. Prankevich, V.M. Zyryanov // Actual issues of mechanical engineering (AIME 2017): proc. of the intern. conf., Tomsk, 27–29 July 2017. Paris: Atlantis Press, 2017. Pp. 325–330. (Advances in Engineering Research. Vol. 133). ISBN 978-94-6252-406-4. DOI: doi:10.2991/aime-17.2017.53.
- Методика расчета основных параметров накопителя энергии по экспериментальным нагрузочным диаграммам [The method of selecting the parameters of the energy storage devices with an abrupt variable load] / В.М. Зырянов, Н.Г. Кирьянова, Г.А. Пранкевич, Д.Ю. Балувев // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 5. С. 105–114.
- Математическая модель системы накопления энергии в составе энергосистемы [Mathematical model of the energy storage system in the power system] / П.А. Бачурин, В.М. Зырянов, Н.Г. Кирьянова и др. // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) [Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018)]. Тр. 14-й междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. В 8 т. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Т. 7. С. 228–234.

Рис. 8