МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МАГИСТРАТУРА

Кафедра «Электроэнергетика»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

6М0718 «Электроэнергетика»

Магистрант _____ Е.К. Исенов

(подпись, дата)

Научный руководитель

к.т.н., профессор _____ В.Ю. Мельников

(подпись, дата)

Допущен к защите:

зав. кафедрой

д.т.н., профессор _____ Е.В. Иванова

(подпись, дата)

Павлодар 2013

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.
	Определения	5
	Условные обозначения и сокращения	8
	Введение	9
1	Проблема хранения энергии	14
1.1	Подъем воды на высоту	14
1.2	Нагнетание воздуха под землю	14
1.3	Электричество в коробке – батареи аккумуляторов	15
1.4	Преобразование электроэнергии в энергию вращения	17
1.5	Интеграция с интеллектуальной сетью	18
	Выводы	18
2	Современные типы накопителей электрической энергии и их использование в энергоустановках с ВИЭ	20
2.1	Графики нагрузки и выработки энергии от ВИЭ	20
2.2	Накопители энергии на основе жидкостных аккумулирующих систем	20
2.2.1	Принцип аккумулирования электрической энергии на основе ГАЭС	20
2.2.2	Оценка запасаемой ГАЭС энергии	22
2.3	Накопители энергии на основе газовых аккумулирующих систем	22
2.3.1	Накопители электрической энергии на основе сжатого воздуха	22
2.3.1.1	Диабатические НЭСВ	22
2.3.1.2	Адиабатические НЭСВ	23
2.3.1.3	Энергетический баланс адиабатической НЭСВ	23
2.3.2	Сглаживание неравномерности выработки электроэнергии от оффшорных ВЭУ	25
2.3.3	Накопители энергии от ВИЭ на основе метана	25
2.3.4	Накопители энергии на основе использования холода - «ночной ветер»	26
2.4	Кинетические накопители энергии - м**аховики**	28
2.5	Электрохимические накопители электрической энергии	31
2.5.1	Свинцово-кислотные аккумуляторы	31
2.5.2	Никель-кадмиевые и никель-металлогидридные аккумуляторы	33
2.5.3	Литий-ионные аккумуляторы	34
2.5.4	Натрий-серные аккумуляторы	38

2.5.5	Импульсные НЭ-электроаккумуляторы	40
2.5.6	НЭ - аккумуляторные батареи большой энергоёмкости	40
2.5.7	Проточные редокс-накопители	40
2.6	Гальванические и топливные элементы	42
2.6.1	Водородный цикл	44
2.6.2	Вторичные источники энергии	49
2.7	Электрические накопители энергии - конденсаторы	49
2.7.1	Емкостные накопители энергии	49
2.7.2	Основные параметры работы импульсных конденсаторов серии СМ и СН	50
2.7.3	Молекулярные накопители энергии	52
2.7.4	НЭ - суперконденсатор	52
2.8	Индуктивные накопители	56
2.8.1	Индуктивные накопители. Сверхпроводящий индуктивный накопитель	57
2.9	Импульсные МГД-генераторы	58
2.9.1	Жидкометаллические МГД-генераторы	58
2.9.2	МГД-генераторы кратковременного действия	58
2.10	Электромашинные преобразователи	59
2.10.1	Синхронные генераторы в режиме ударного и динамического торможения	59
2.10.2	Униполярные ударные генераторы	60
2.10.3	Компрессионные генераторы	60
2.10.4	Электромагнитные накопители электрической энергии	62
2.11	Накопители электроэнергии большой мощности для технологии Smart Grid	62
2.12	Гибридный накопитель электрической энергии	65
	Выводы	68
3	Применение накопителей энергии в различных отраслях	69
3.1	Особенности выбора накопителя для систем с ВИЭ	69
3.2	Структура системы накопления энергии	70
3.3	Накопитель сетевой - аккумулятор от 1 МВт	71
3.4	Сетевой накопитель электроэнергии 100 кВт	72
3.5	Термодинамический накопитель энергии	72
3.6	Накопитель энергии в устройстве стабилизированного питания электроприемника	73
3.7	Емкостной накопитель в системе динамического нагружения двигателя постоянного тока независимого возбуждения	76
3.8	Использование накопителей энергии для улучшения	78

	параметров локомотивов	
3.9	Использование накопителей энергии на тяговых подстанциях постоянного тока	82
3.10	Расчет и выбор ВИЭ-электроэнергетической системы с накопителем электрической энергии	88
	Выводы	99
	Заключение	100
	Список использованных источников	101

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Алюминиевый электролитический конденсатор - компактные, но "с потерями". Диапазон от 1 мкФ до 1000000 мкФ с рабочим напряжением до нескольких сотен вольт постоянного тока. Диэлектрик тонкий слой оксида алюминия. Биполярные электролитические содержат два последовательно соединенных конденсатора и используются для соединения сигналов переменного тока;

анализ чувствительности - изучение зависимости одной переменной к изменению другой переменной;

аэрогеля конденсатор - эти конденсаторы используют углеродные аэрогели, до тысячи Фарад. Может быть использован в качестве замены батареи в тех случаях, когда необходим большой ток разряда, например, в электрических транспортных средств. Они также могут быть заряжены сотни тысяч раз;

вторичный энергетический ресурс - энергетический ресурс, полученный в результате осуществления технологического процесса или использования оборудования, функциональное назначение которого не связано с производством соответствующего вида энергетического ресурса;

газопоршневой агрегат - газовый двигатель внутреннего сгорания, работающий на газовом топливе;

динамичность - определяется в развитии системы как влияние настоящего состояния на будущее, т.е. во многом предопределяется развитие системы в будущем принятием текущих решений;

коэффициент полезного использования энергии – отношение всей полезно используемой на энергопотребляющей установке энергии к суммарному количеству израсходованной энергии в пересчете ее на первичную;

коэффициент полезного действия – величина, характеризующая совершенство процессов превращения, преобразования или передачи энергии, являющаяся отношением полезной энергии к подведенной;

массовая теплоёмкость — это количество теплоты, которую необходимо подвести к единице массы тела (обычно 1 кг), чтобы нагреть его на 1 К, измеряется в джоулях на килограмм на кельвин (Дж/кг К);

надёжность – комплексное свойство системы выполнять заданные функции при заданных условиях и ограничениях функционирования;

полезная энергия – энергия, теоретически необходимая (в идеализированных условиях) для осуществления заданных операций, технологических процессов или выполнения работы и оказания услуг;

стабильность – способность системы в развитии сохранять свою структуру и экономичность;

Ультра Конденсатор Широкополосный (UBC) - компонент, который имеет ультранизкие вносимые потери, ровную АЧХ и отличный частотный спектр;

ультраконденсатор - также известный как Суперконденсатор или электрохимический конденсатор, или электрический двухслойный конденсатор (EDLC). Сделанный из углеродного аэрогеля, углеродные нанотрубки, или высокопористых материалов электрода. Чрезвычайно высокого потенциал. Может использоваться в некоторых приложениях вместо аккумуляторных батарей;

экономичность – свойство системы осуществлять свои функции с минимумом затрат при наличии определённых ограничений. Это свойство отнесено к группе функционирования, так как оно в большей мере проявляется в период эксплуатации;

электроемкость – отношение производственных затрат электроэнергии к объему выработанной продукции, выполненной работы;

энергетический ресурс - носитель энергии, энергия которого используется или может быть использована при осуществлении хозяйственной и иной деятельности, а также вид энергии (атомная, тепловая, электрическая, электромагнитная энергия или другой вид энергии);

энергетическая система – основное технологическое звено энергетического производства, представляющая собой совокупность электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей, связанных общностью режима работы и имеющих централизованное оперативно-диспетчерское управление;

энергетическая эффективность - характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу,

юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю; выявление и реализация мер и инструментов с целью обеспечения удовлетворения потребностей в услугах и товарах при наименьших экономических и социальных затратах на необходимую энергию и при минимальных расходах, необходимых для сохранения природной среды в гармонии с устойчивым развитием на местном, национальном, региональном и мировом уровнях;

энергопотребление – физическая величина, отражающая количество потребляемого хозяйственным субъектом энергоресурса определенного качества, которая используется для расчета показателей эффективности;

энергосбережение – деятельность (организационная, научная, практическая, информационная), направленная на рациональное использование и экономное расходование первичной и преобразованной энергии и природных энергетических ресурсов в национальном хозяйстве и реализуемая с использованием технических, экономических и правовых методов.

В диссертации использованы традиционно применяемые в литературе по электроэнергетике единицы измерения: А, В, Ом, кВт, МВт, Гц, кВт-ч и др.

Условные обозначения и сокращения:

А – аккумулятор;
АББМ - аккумуляторная батарея большой мощности;
АКБ – аккумуляторная батарея;
ВВТЭ - водородно-воздушные топливные элементы;
ВИЭ - возобновляемые источники энергии;
ВРБ - ванадиевый редокс-накопитель батарея;
ВЭС – ветроэлектростанция;
ГА – гидроаккумулятор;
ГАЭС – гидроаккумулирующая электростанция;
ГПУ - газопоршневая энергоустановка;
ГЭС – гидроэлектростанция;
ДНВ -двигатель постоянного тока независимого возбуждения;
ДЭС - двойной электрический слой;
ИБП - источник бесперебойного питания;
ИКЭ - импульсный конденсатор энергоемкий; конденсатор большой емкости; суперконденсатор;
ИНЭ - индуктивный накопитель энергии;
ЛИА - литий-ионные аккумуляторы;
ЛИАБ - литий-ионная аккумуляторная батарея;
ЛЭП - линия электропередачи;
КНЭ - кинетический накопитель энергии;
КПД – коэффициент полезного действия;
КСП - конденсаторная система пуска;
НКА - никель-кадмиевый аккумулятор;
НСА - натрий-серный аккумулятор;
НЭ - накопители энергии;
НЭСВ - накопители электрической энергии на основе сжатого воздуха;
ПГ – парогенератор;
САУ - система автоматического управления;
СВЭУ - солнечно-водородная энергоустановка;
СДН - система динамического нагружения;
СК – суперконденсатор; импульсный конденсатор энергоемкий; конденсатор большой емкости;
СКА - свинцово-кислотный аккумулятор;
СНЭЛ - системы накопителей электроэнергии;
СП - солнечные панели;
СПИН - сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии;
ТА – тепловой аккумулятор;
ТЭ - топливный элемент;
ФЭП – фотоэлектрический преобразователь;
ЭМС - электромеханическая система;
ЭС – электростанция.

Введение

Проблема хранения энергии - одна из важнейших не только в энергетике, но и в экономике. Она до сих пор не решена в полной мере. Наше неумение эффективно сохранять и запасать полученную энергию особенно пагубно сказывается на развитии таких сравнительно «чистых» способов ее производства с использованием возобновляемых источников энергии, как гидроэнергетика, гелиоэнергетика или ветроэнергетика. Мы до сих пор не в состоянии обеспечить гарантированное поступление энергии потребителям от таких источников в связи с понятными суточными, сезонными, а то и вовсе плохо прогнозируемыми изменениями их мощности.

Важную роль в интеллектуальной энергетике будут играть нетрадиционные для сегодняшнего дня виды генерации: малая, распределенная по большим территориям, находящаяся у потребителей, основанная на ВИЭ. Кроме того, со временем распространение у крупных и средних потребителей получат системы накопления электроэнергии. Массовым распределенным накопителем электроэнергии станет личный и общественный электрический транспорт – электромобили, электро-автобусы и т.д. Только мультиагентная система управления открывает возможность массового использования такого рода генерации, но для этого необходимы особые решения по эффективному управлению этой генерацией.

Проблема внедрения мультиагентного управления заключается в том, что существующая система управления энергосистемой вообще не позволяет массово интегрировать нетрадиционные виды генерации и управлять ими с заданным уровнем надежности системы в целом, равно как эта система не позволяет массово размещать малую генерацию у потребителей. Эти ограничения связаны с тем, что управление массовой малой ВИЭ-генерацией в централизованной системе представляет собой слишком сложную задачу. Кроме того, нетрадиционная ВИЭ-генерация и активные потребители, как правило, имеют крайне неравномерный график выдачи электроэнергии в сеть. Управление такими специфическими, тем более массовыми объектами ВИЭ-генерации представляет собой до сих пор не до конца решенную задачу. Для этого необходимы особые комплексные решения в рамках мультиагентного подхода.

Распределенная генерация. Развитие современных технологий усиливает зависимость человеческой деятельности от энергоснабжения во всех областях - и в доме, и на работе, и на отдыхе. Непосредственная зависимость человеческой жизни от бесперебойного энергоснабжения растёт в транспорте, начиная с лифтов, и кончая системами обеспечения безопасности на скоростных железнодорожных магистралях, и в медицине, полагающейся сегодня на сложные и дорогие приборы. Конечно, есть много уголков, куда не достают сети энергетических компаний - и там ещё сильнее становится зависимость от имеющихся источников электричества и тепла.

Пока что основными интересами потребителей остаются возможности резервирования, экономия за счёт снижения расходов, повышенный КПД одновременной генерации тепла и электроэнергии. Энергокомпании уже начинают рассчитывать на существенную поддержку от распределённых генераторов при пиковых нагрузках, на использование этих мощностей для снижения потерь и улучшения параметров работы сети.

Привлекательной для потребителя оказывается и возможность экономии в периоды пиковых нагрузок и растущих цен. Развитие конкурентного рынка доведёт рано или поздно дифференциацию цен до уровня розничного потребителя, и близки уже те времена, когда цена кВт-ч будет меняться в реальном времени. Чем более адекватными будут ценовые сигналы, получаемые потребителем, тем выгоднее будет включать собственный генератор для арбитража между ценами топлива и электричества. С распространением топливных элементов даже электромобиль в гараже может стать выгодно подключать по вечерам к управляемой компьютером домашней электросети и использовать как дополнительный генератор.

Использование микрогенераторов может способствовать поддержанию высокого качества энергии в централизованной сети и снижать потребность в затратах на реконструкцию и обновление сетей и подстанций. Распределённые генераторы позволяют осуществлять поддержку напряжения и частоты, уменьшать потери в сетях и затраты на поддержание центральных резервов. Подробнее услуги, которые владельцы распределённых генераторов могут оказывать сетевой или генерирующей компании, рассмотрены ниже.

Электротранспорт. Электротранспорт со съемными энергоблоками (PEV, eCAR и т.п.) продолжает завоевывать популярность по мере усиления тревог по поводу состояния окружающей среды. Электротранспорт значительно снижает уровень выбросов парниковых газов и зависимость от ископаемого топлива. Он станет значительным фактором роста нагрузки с потенциалом потребления 600 ТВт/год, предположительно 30 КВтч для расстояния в 100 миль (15), и 10000 миль в год для 200 млн. единиц электротранспорта в США. Для полноценного внедрения электромобилей необходимо решить проблему времени подзарядки. Длительное время подзарядки зачастую ведет к невозможности использования электромобилей, а короткое время подзарядки создает перегрузки, особенно на уровне распределения.

Пока энергию, вырабатываемую ВИЭ-установками, не научатся повсеместно хранить в промышленных масштабах, ее производство не станет полноценной альтернативой традиционным способам генерации**.**

В феврале 2008 г. во время внезапного похолодания обычно суровые ветры западного Техаса успокоились, и тысячи ветряных турбин, которыми изобилует эта часть штата, остановились. Операторы местных энергетических компаний, не имея возможности восполнить недостаток

мощности в сети, были вынуждены отключить электроснабжение потребителей, пока ветер не возобновился.

Периоды безветрия не оказывали бы никакого воздействия, если бы у энергетических компаний находилось в запасе несколько сотен мегаватт-часов, которые можно использовать в непредвиденных ситуациях. Но их не было. Хранить электроэнергию в больших количествах трудоемко и дорого, даже недолгое время.

Обязанные обеспечивать ее надежную подачу в условиях непрерывно меняющегося объема потребления, операторы генерирующих предприятий обычно прибегают к дорогостоящим и неоптимальным способам регулирования мощности электростанций или включают пиковые энергетические установки в периоды максимума нагрузок.

Эта практика, становится все менее жизнеспособной ввиду увеличения количества объектов на базе возобновляемых источников энергии, таких как солнечные и ветряные электростанции. Как показано на примере с Техасом, объем поставляемой мощности ВИЭ-агрегатов зависит от погодных условий, а не от потребности абонентов.

Уже существует ряд соответствующих технологий. Требуется сделать подобные решения отказоустойчивыми, надежными и экономически оправданными, при этом наилучшим образом подходящими для конкретных источников энергии или мест эксплуатации.

В этой связи работа является **актуальной**.

Идея работы заключается в анализе существующих и поиске новых, инновационных методик, способов, оборудования, научно-технических и научно-технологических решений сохранения и накопления энергии, повышающих эффективность использования электроэнергетических ресурсов, получаемых от возобновляемых источников энергии.

Целью работы является изучение возможностей повышения энергетической эффективности электротехнических систем с ВИЭ на основе применения и создания инновационных методов, средств и технологий сохранения и накопления электрической энергии.

Научная новизна работы заключается в обобщении, развитии и систематизации научно-технических и научно-методических основ создания и применения устройств, систем и технологий для накопления электрической энергии и ее эффективного применения в электроэнергетических, электротехнических, электромеханических, электроинформационных и других объектах с возобновляемыми и нетрадиционными источниками энергии.

В рамках поставленных задач автором предложены инновационные научные и технические решения:

- разработаны научно-обоснованные предложения по обеспечению сохранения и накопления энергетических ресурсов, являющихся инновационными научными, научно-техническими и научно-технологическими решениями, аккумулирующими опыт технологически развитых стран для применения в системах с возобновляемыми и нетрадиционными источниками энергии;

- выполнен системный анализ накопителей электрической энергии, основой для которого послужили бенч-маркинговые исследования научных результатов и технологических применений ведущих мировых разработчиков и производителей оборудования и технологий в области;

- разработаны научно-обоснованные предложения и технические реализации инновационных накопителей электрической энергии, которые создадут основу для дальнейшего развития прорывных технологий в области создания «интеллектуальной электроэнергетики» и энергоэффективных производств 21 века в Республике Казахстан.

Практическая ценность работы заключается в том, что внедрение результатов работы в эксплуатационную, проектную и исследовательскую практику обеспечивает развитие и продвижение инновационных технологий в области возобновляемой энергетики, создавая конкурентную среду в энергетическом секторе производства, обеспечивая повышение эффективности использования энергетических ресурсов за счет применения устройств, систем и технологий накопления и сохранения электрической энергии.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием аналитических и практических методов, научных и методических материалов, специализированных программных продуктов, приборов и технического оборудования научно-исследовательского института «Энергоресурсосберегающих технологий», учебно-исследовательской лаборатории «Возобновляемые источники энергии» Инновационного Евразийского университета, а также предприятия «Контакт-Энерго-А» г. Астана.

Методы исследования. В процессе выполнения исследований применялись методы теории научного познания с позиций конструктивного обобщения явлений преобразования одного вида энергии в другой; исследование и обобщение научно-технических источников, включая интернет ресурсы, а также методы: теории электрических цепей, теории электромеханического, электрохимического и электромагнитного преобразования энергии; теории гидравлических и механических систем; теории оптимизации; экономико-математические методы; методы математического и компьютерного моделирования.

На защиту выносятся:

- предложения по обеспечению условий, режимов и ограничений научно-обоснованного применения накопителей электрической энергии в технических объектах различного функционального назначения с возобновляемыми и нетрадиционными источниками, для обеспечения энергоэффективной генерации электрической энергии, передачи-распределения-преобразования и ее использования;

- решения, обеспечивающие эффективное накопление электрической энергии, для различных научно-производственных, научно-технических и научно-технологических применений, основанные на лучших мировых практиках и рекомендованные для электроэнергетических и электротехнических объектов нового поколения, в том числе: «интеллектуальные сети», «виртуальные» электростанции, транспорт и возобновляемая энергетика.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях: научного семинара кафедры «Электроэнергетика»; научно-технического совета НИИ «Энергоресурсосберегающих технологий»; исследовательской научной группы лаборатории «Возобновляемые источники энергии» Инновационного Евразийского университета; на техническом совете предприятия «Контакт-Энерго-А» г. Астана; на заседаниях секций научных конференций, семинаров и совещаний по инновационным энергетическим системам; на совещаниях по вопросам развития возобновляемых источников энергии и энергоэффективности при акиме г. Астана в 2012-2013 г.г.

Настоящие исследования, изложенные в диссертационной работе, выполнялись в рамках: плана научных исследований по Программе энергосбережения и повышения энергетической эффективности НИИ «Энергоресурсосберегающих технологий» Инновационного Евразийского университета, а также в рамках плана развития предприятия «Контакт-Энерго-А» г. Астана.

Публикации. Содержание работы изложено в двух научных трудах.

1 Проблема хранения энергии

1.1 Подъем воды на высоту

Страны северной части Европы создают оффшорные ветропарки для использования энергии ветров Северного моря. Дания уже получает около 20% электроэнергии от наземных и морских ветряных электростанций и планирует довести этот показатель до 50% к 2025 г. Но поскольку в регионе в течение нескольких дней подряд может наблюдаться штиль, Дания и Голландия повышают интегрированность своих сетей с энергосистемой Норвегии, где подавляющая часть электроэнергии вырабатывается ГЭС. Горные водохранилища Норвегии обеспечивают запас резервной мощности и обладают значительным потенциалом гидроаккумулирования: так, при избытке электроэнергии вода закачивается в водохранилища, а при возрастании энергопотребности сливается, приводя в действие генераторы.

Эффективность гидроаккумулирования составляет 70–85%, кроме того, это наиболее разработанная и широко распространенная технология, используемая для крупномасштабного накопления электроэнергии. Например, Китай, Япония и США располагают многочисленными ГАЭС мощностью от десятков МВт до нескольких ГВт. Гидроаккумулирование оптимально подходит для компенсации выработки ветроустановок, ведь вода, закачанная в верхний бьеф ГАЭС, может находиться там длительное время, позволяя покрывать довольно продолжительные «провалы» в подаче мощности от ветряных электростанций.

Реализация технологии гидроаккумулирования подразумевает наличие гор, что ограничивает ее распространенность. Сооружение таких систем аккумулирования разрушительно для окружающей среды, а возведение высоковольтных ЛЭП, соединяющих удаленную систему аккумулирования энергии с электрической сетью, вызывает протесты экологов.

Одна из инновационных концепций компании *KEMA* предполагает размещение ВЭУ и ГАЭС в одном месте — в виде «энергетического острова» на мелководье Северного моря. Район, площадь которого составит около 60 кв. км, будет окружен дамбой, образующей искусственное озеро. ВЭУ планируется установить по периметру дамбы и в случае избытка электроэнергии перекачивать воду из озера в море. При перетоке воды обратно в озеро станет вырабатываться «запасенная» электроэнергия. Такой «энергетический остров» в отсутствие ветра способен обеспечить мощность около 1500 МВт в течение 12 часов.

1.2 Нагнетание воздуха под землю

Установленная в сельской местности рядом с немецким городком Гунторф (около 100 км на юго-запад от Гамбурга) и имеющая обычный вид

промышленная электростанция выполняет нетрадиционную задачу: при низком уровне электропотребления она использует излишки энергии для закачивания воздуха в две подземные соляные шахты общим объемом более 300 тыс. куб. м. Затем, в период пиковой нагрузки, сжатый воздух подается в расположенные на поверхности турбины, генерирующие электроэнергию.

Электростанция в Гунторфе, эксплуатируемая с 1978 г. и способная в течение трех часов обеспечить резервную мощность почти 300 МВт, приводится в действие около 100 раз в году. Но эта технология не нашла массового распространения. Подобный объект меньшей мощности в городе Макинтош (США, штат Алабама) был введен в эксплуатацию в 1991 г. В 2002-м планировалось возведение еще одной аналогичной станции в штате Айова, но проект до сих пор находится на стадии выбора места для пробного бурения.

Проблема в том, что обслуживание воздухоаккумулирующей электростанции сложно; при сжатии воздух сильно нагревается, данное обстоятельство ограничивает объем газовоздушной смеси, который можно закачать в подземный резервуар до того, как температура повысится до опасного уровня. Помимо этого, чем дольше хранится горячий газ, тем больше тепловой энергии теряется, проникая через стены шахты.

На электростанциях в Гунторфе и Макинтоше сжатый воздух подается в стандартные газовые турбины, что увеличивает эффективность системы. Таким образом, наиболее выгодным применение воздухоаккумулирующей технологии видится в составе генерирующих объектов на природном газе.

С прицелом на перспективу *EPRI* и другие исследовательские организации находятся в поиске инноваций, которые позволят преобразовать *CAES* в объекты аккумулирования энергии, не требующие привлечения ископаемого топлива. Как ожидается, их эффективность достигнет 80%, что сравнимо с эффективностью гидроаккумулирующих систем. Суммарные расходы на строительство и эксплуатацию будут также сопоставимы.

1.3 Хранение электричества: батареи аккумуляторов

Задача крупномасштабного аккумулирования энергии была бы уже решена, если бы генерирующие компании могли использовать повсеместно распространенные свинцово-кислотные батареи, почти столетие являющиеся основным типом автомобильных аккумуляторов. К сожалению, свинцово-кислотные накопители отличаются малым количеством циклов заряда-разряда и низкой плотностью энергии, кроме того, они более громоздкие и тяжелые по сравнению с другими аккумуляторами аналогичной емкости.

Более приемлемое решение — натрий-серные аккумуляторы (*NaS*), которые запасают энергию с помощью химической диссоциации полисульфидов натрия на чистые натрий и серу. Высвобождение энергии происходит при реакции этих двух элементов. Натрий-серные аккумуляторы характеризуются высокой плотностью энергии и способны выдержать

несколько тысяч циклов заряда-разряда. Основной проблемой здесь становится хранение соды и серы в отдельных резервуарах в расплавленном состоянии при температуре около 300 °С. К тому же при полном разряде и охлаждении аккумулятор необратимо повреждается. Необходимость использования надежных контейнеров и соблюдения прочих технических требований увеличивает стоимость одного кВт мощности натрий-серных аккумуляторов до 3 тыс. долл.

Несмотря на это, коммерческое производство натрий-серных батарей налажено японской компанией *NGK Insulators* (Нагоя). Суммарная мощность работающих аккумуляторов подобного типа в Японии составляет около 300 МВт, причем энергия может подаваться в сеть в периоды пикового потребления в течение шести часов подряд. Другие страны также продвигаются в данном направлении. В США, например, мощность уже действующих натрий-серных аккумуляторов достигла 10 МВт, и примерно такой же объем мощности планируется установить. Лидируют в этой сфере компании *American Electric Power* и *Xcel Energy* из Миннеаполиса (штат Миннесота).

В будущем крупномасштабные системы аккумулирования на основе натрий-серных батарей смогут конкурировать с решениями на литий-ионных аккумуляторах. Литий-ионные технологии, широко применяемые в мобильных телефонах и ноутбуках, а также активно разрабатываемые для электромобилей, отличаются высокой плотностью энергии и эффективностью более 90%. Их основным недостатком считается высокая цена, что частично является следствием жестких требований к безопасности: в аккумуляторах используется легковоспламеняемый раствор солей лития в органических веществах, это в свою очередь требует максимально надежной конструкции для предотвращения опасности возгорания. Каждый запасенный кВт•ч электроэнергии литий-ионных аккумуляторов стоит несколько сотен долларов. Для того чтобы указанная технология получила широкое распространение в автомобилестроении, стоимость аккумулирования энергии должна быть в пределах 100 долл./кВт•ч, а в электроэнергетической отрасли еще ниже.

Обеспечить безопасность батарей для стационарных систем намного проще и дешевле, чем накопителей энергии для мобильных устройств. Литий-ионные технологии активно внедряются в Азии, где существует острая конкуренция между производителями, которая в конечном счете приведет к снижению стоимости аккумуляторов. Дональд Садоуэй (Donald Sadoway), специалист-химик из Массачусетского технологического института, уверен: данный параметр можно минимизировать еще более радикально, «и способ сделать это — производить батареи из грязи», то есть на основе самых распространенных в земной коре элементов. Несмотря на то, что электрохимическая реакция элементов (например, кремния, железа и алюминия) практически полностью изучена, появляется огромное количество неисследованных сочетаний материалов. «Поиски стали реальными, —

говорит Д. Садоуэй, — благодаря суперкомпьютерам, поэтому в ближайшее десятилетие интенсивность исследований повысится».

1.4 Преобразование электроэнергии в энергию вращения

Одним из простейших способов аккумулирования энергии (по крайней мере, концептуально) является применение маховиковых накопителей: электрическая энергия преобразуется в кинетическую посредством вращения маховика, разгоняемого электродвигателем. Кинетическая энергия отбирается по мере необходимости при подсоединении маховика к генератору.

Впрочем, в действительности все намного сложнее: маховик должен вращаться очень быстро, чтобы удерживаться в элементах крепления. Системы аккумулирования на основе маховиковых накопителей позиционируются на рынке как источники бесперебойного питания, способные выдать достаточную мощность в течение нескольких секунд или минут, но они непригодны для длительного хранения энергии.

Значимым преимуществом маховиков можно назвать их способность быстро поглощать энергию и так же быстро ее отдавать. Это именно то, что требуется для регулирования частоты электрической сети, которую надо поддерживать на уровне 50 или 60 Гц (в зависимости от страны), но которая уменьшается каждый раз, когда кратковременное повышение нагрузки вызывает замедление вращения турбин. С учетом данного фактора компания *Beacon Power* из штата Массачусетс в течение прошедшего десятилетия разрабатывала высокотехнологичный маховиковый накопитель, оптимизированный для целей регулирования частоты сети. Устройство высотой 2 м и диаметром 1 м состоит из цилиндрического алюминиевого ядра, в которое помещены электродвигатель и генератор, и композитного обода из углеродного волокна. Маховик опирается на магнитные подшипники, расположенные внутри вакуумированной камеры, и может раскручиваться до 16 тыс. об./мин. *«Накопитель рассчитан на эксплуатацию в течение 20 лет, не требуя при этом технического обслуживания,* — рассказывает Мэтью Лазаревич (*Matthew Lazarewicz*), глава технического отдела компании *Beacon Power*. *— Он способен хранить энергию с эффективностью 85%, ускоряться или замедляться миллионы раз в течение срока службы, что делает его более долговечным по сравнению с аккумуляторными батареями»*.

Основной задачей сегодня становится уменьшение стоимости проекта, чего Beacon Power надеется достичь с помощью кредита, полученного от Министерства энергетики США. В Стефентауне (штат Нью-Йорк) эта компания начала возводить станцию с 200 маховиковыми накопителями стоимостью 70 млн долл. и мощностью 20 МВт, которая поможет регулировать частоту в региональной электрической сети. Бюджет включает множество разовых расходов, связанных с определением характеристик

станции, необходимых для программы федеральных гарантий по кредиту. Специалисты ожидают, что в будущем цена подобных проектов снизится до 30 млн долл. В конце ноября Министерство энергетики выделило *Beacon Power* на сооружение еще одной 20-мегаваттной станции рядом с Чикаго (штат Иллинойс) 24 млн долл., что составляет половину суммы всех затрат.

1.5 Интеграция с интеллектуальной сетью

Существует немалое количество еще более высокотехнологичных решений, применимых в целях крупномасштабного аккумулирования энергии при условии, что исследователи сумеют со временем уменьшить стоимость этих технологий до конкурентоспособного уровня. В качестве примера можно привести суперконденсаторы, способные накапливать мощный электрический заряд на электродах, расстояние между которыми составляет несколько атомных слоев, и сверхпроводниковые накопители, запасающие огромное количество энергии в магнитном поле.

Но едва ли не самый экономически эффективный способ крупномасштабного аккумулирования энергии — сокращение данной потребности как таковой. Это одна из целей американской стимулирующей программы, в рамках которой планируется выделить 4,3 млрд долл. на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в сферах ВИЭ-генерации, энергоэффективности и, что особенно важно, развития технологий интеллектуальных сетей. Вместо регулирования генерируемой мощности в зависимости от непредсказуемо меняющегося потребления станет возможным регулирование потребления устройствами самой интеллектуальной сети.

Выводы

1) Эффективнее выравнивать пики и провалы нагрузки целесообразно путем совместного применения в инновационных системах технологии аккумулирования энергии и технологии интеллектуальных сетей;

2) Устранить колебания нагрузки и электрических параметров: напряжение, ток в полной мере не представляется возможнам, но благодаря аккумулированию энергии эти колебания станут намного менее критичными;

3) Благодаря системам аккумулирования электрической энергии в сочетании с ВИЭ в перспективе:

- даже малые города окажутся энергетически самодостаточными, так как будут способны генерировать ровно столько электроэнергии, сколько требуется для удовлетворения собственных нужд, и обеспечивать надежное энергоснабжение путем обмена мощностью с соседними населенными пунктами;

- все местные электрические сети можно сделать низковольтными, а протяженные высоковольтные линии будут нужны только для подсоединения к густонаселенным регионам удаленных ветряных, солнечных электростанций или в интеграции с интеллектуальной сетью.

2 Современные типы накопителей электрической энергии и их использование в энергоустановках с ВИЭ

2.1 Графики нагрузки и выработки энергии от ВИЭ

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) обычно (за исключением ГЭС и биомассы) отличаются непостоянством и непредсказуемостью временных зависимостей выдаваемой мощности. Можно выделить сезонные и суточные неравномерности генерации, в то время как график нагрузки потребителя обычно имеет свойство меняться по времени суток и временам года. Все это приводит к тому, что необходима система, позволяющая согласовать генерацию и потребление энергии от ВИЭ.

Касаясь ВИЭ, следует добавить, что характерной особенностью их применения является существенная сезонная разница в интенсивности солнечного излучения и ветров (рис.1). Поэтому помимо сглаживания суточных неравномерностей генерации и потребления необходимо рассмотреть накопители, обеспечивающин длительное хранение энергии, с возможностью ее выдачи в течение десятков суток после ее выработки.

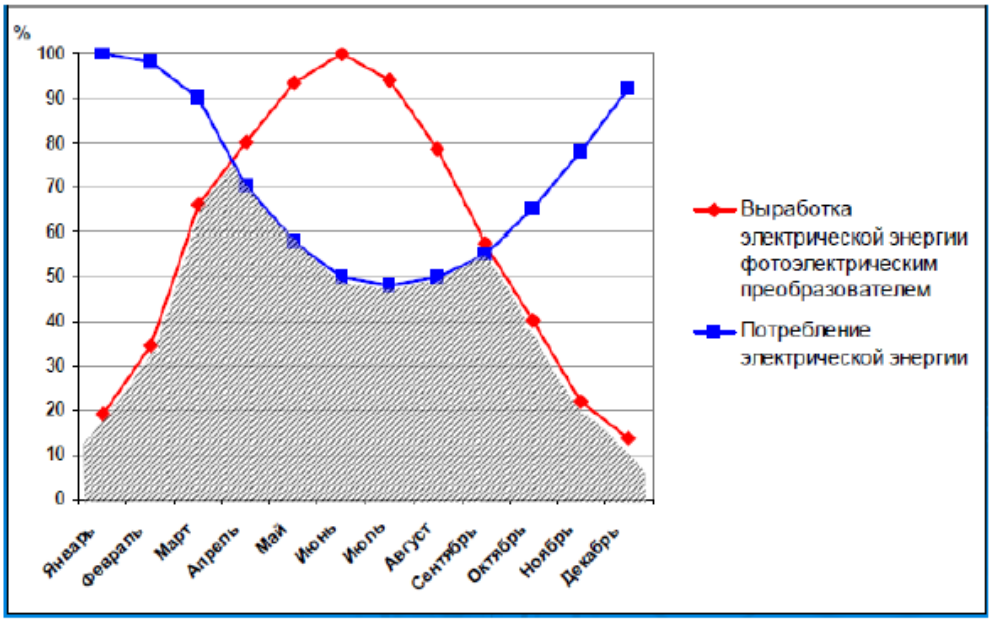


Рис. 1. Графики выработки и потребления электроэнергии с применением ФЭП [1].

2.2 Накопители энергии на основе жидкостных аккумулирующих систем

2.2.1 Принцип аккумулирования электрической энергии на основе ГАЭС

Гидроаккумулирующая система хранения энергии - одна из ранних технологий запасания больших объемов энергии. Для аккумуляции энергии

используются гидроаккумулирующие станции - ГАЭС - разновидность ГЭС, специально предназначенную для выравнивания суточной неоднородности электрической нагрузки.

ГАЭС использует в работе комплекс электрических генераторов и электрических насосов. Во время минимума энергопотребления ГАЭС получает из энергосети дешевую электроэнергию и расходует ее на перекачку воды в верхний бьеф, т. е. действует как насос. А во время утреннего и вечернего пиков энергопотребления ГАЭС сбрасывает воду из верхнего бьефа в нижний, вырабатывая при этом дорогую «пиковую» электроэнергию, которую отдает в энергосеть. В итоге ГАЭС потребляет больше электроэнергии, чем вырабатывает, т. е. формально оказывается убыточной. Но потребляет ГАЭС «дешевую» энергию, а поставляет в сеть «дорогую». Коммерческая стоимость электроэнергии в период наивысшего «пикового» потребления в энергосистеме гораздо выше, чем в период ее минимального потребления и использование ГАЭС оказывается экономически эффективным.

В ГАЭС турбины вращаются потоком набегающей воды за счет разности уровней верхнего и нижнего водяного резервуара, преобразуя потенциальную энергию воды в механическую и электрическую.

В последнее время широкое распространение получают комбинированные системы – ГА, построенные на реках и способные работать в режиме обычной ГЭС [2]. Это позволяет снизить капитальные затраты и увеличить маневренность системы. Дополнительным плюсом является возможность длительной эксплуатации наиболее капиталоемких сооружений - плотин. Основными факторами, определяющими возможность постройки ГА, его максимальную емкость и капитальную стоимость, являются особенности рельефа местности, а также необходимость затопления территорий. Поэтому в Европе и Японии в настоящее время основной упор сделан не на строительство новых, а на модернизацию старых систем такого типа и надстройки в виде ГА над существующими ГЭС [2]. Применение ГАЭС эффективно, когда регулируется работа не одной ЭС на основе традиционных технологий или ВИЭ, а крупной энергосистемы [3]. В мире ГАЭС строят уже более 100 лет. Первая ГАЭС мощностью около 100 кВт (Леттем, Швейцария, 1882 г). Сейчас в мире насчитывается ГАЭС мощностью около 300 млн кВт [2]. Крупные каскады ГАЭС в гористых районах Европы являются хорошим инструментом для регулирования энергетических потоков в электрических сетях, особенно в условиях возрастающей доли нестабильных ВИЭ, таких как солнце и ветер, в энергобалансе Европейского Союза.

При строительстве ГАЭС, как и при строительстве крупных ГЭС, необходимо затапливать определенную территорию, что ведет к изменениям состава водной флоры и фауны, выводу из оборота земель назначения, отселению населенных пунктов.

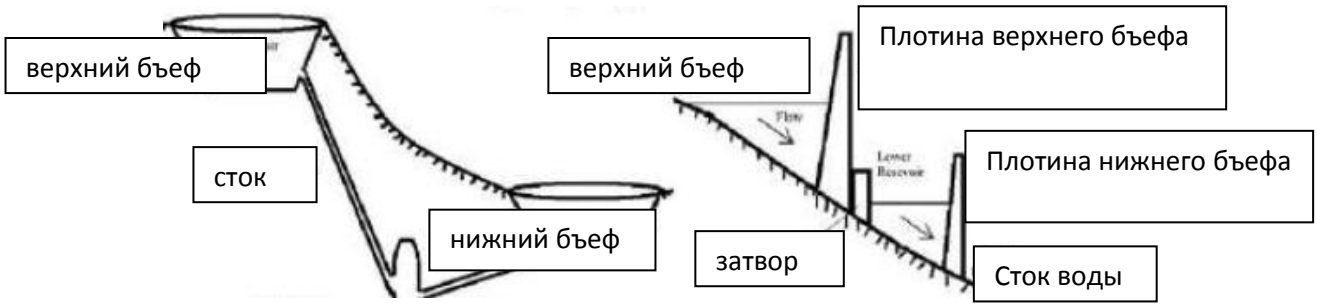


Рис.2. Схема классической ГАЭС (слева) и гибридной ГАЭС-ГЭС (справа).

2.2.2 Оценка запасаемой ГАЭС энергии

Энергию, запасаемую ГАЭС можно оценить, зная высоту h между верхним и нижним бъефами и массу воды M, запасенную в верхнем водоеме по выражению:

$$W1=M*g*h*ŋ,$$

где g – ускорение свободного падения;

ŋ – кпд генераторов и преобразователей.

Следует учитывать «мертвый» объем воды, который находится в верхнем водоеме ниже уровня шлюза.

Энергия W2, затрачиваемая на перекачку воды в верхний водоем:

$$W2= N*t,$$

где N – суммарная мощность насосов;

t – время, затрачиваемое на заполнение водой верхнего водоема.

2.3 Накопители энергии на основе пневмоаккумулирующих систем

2.3.1 Накопители электрической энергии на основе сжатого воздуха.

Сжатие воздуха считается одним из самых дешевых способов хранения энергии. Например, в ясный день солнечная ЭС будет производить избыток электроэнергии, которую направят на сжатие и закачку воздуха. Когда понадобится электричество, сжатый воздух будет крутить турбины. Так будет преодолена проблема хранения и преобразования энергии от ВИЭ.

Для крупных энергетических систем используются НЭ на основе сжатого воздуха - **НЭСВ**. Избыточная электрическая энергия, вырабатываемая ВИЭ, используется для питания мощных компрессоров, закачивающих воздух под давлением в резервуар. Традиционные станции

этого типа используют природные подземные полости, например, солевые каверны в качестве воздушного резервуара [6]. Естественно, что такая каверна не должна иметь щелей и трещин, она также должна выдерживать рабочее давление воздуха без разрушения.

Чем больше давление воздуха, тем большую энергию можно запасти в том же объеме.

Запасенная энергия примерно пропорциональна произведению объема хранилища на разницу давлений воздуха в заполненном и разряженном состоянии.

2.3.1 1Диабатические НЭСВ

Для извлечения энергии из такого резервуара необходим подвод тепла извне: выдаваемый на газовую турбину воздух при разрядке накопителя подогревается за счет сжигания природного газа. Схема приведена на рис. 3.

Поскольку в процессе используется внешний подвод тепла, такие НЭСВ называются диабатическими.

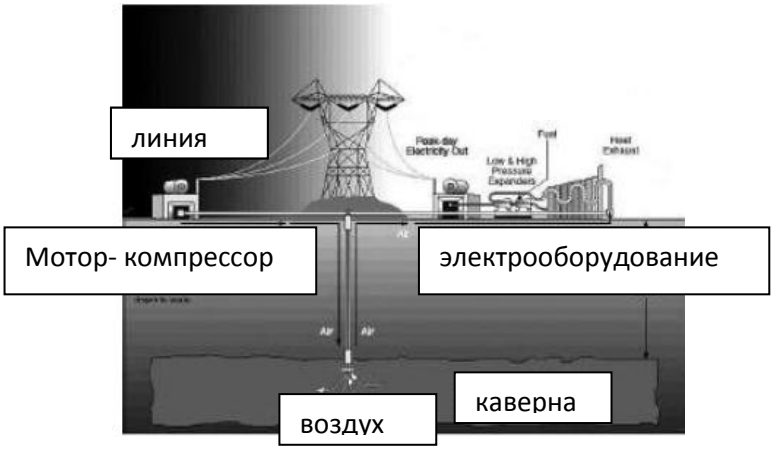


Рис.3. Диабатический НЭСВ

Достоинства таких НЭСВ: возможность глубоких разрядов; высокие ресурсные характеристики; снижение капитальных затрат за счет использования серийно выпускаемого и применяемого в других отраслях промышленности оборудования – компрессоров и газовых турбин, адаптированных к разным диапазонам мощностей; сотни мегаватт энергетических потоков, балансируемых НЭСВ, что отвечает крупным ВИЭ, городам и даже целым регионам. Необходимо использовать для подогрева природный газ, необходимо искать подходящие каверны. НЭСВ плохо масштабируется на малые мощности.

2.3.1.2 Адиабатические НЭСВ

Адиабатические НЭСВ используют тепловую энергию, генерируемую при сжатии воздуха. В этом случае снимаемое с компрессора тепло накапливается в тепловом аккумуляторе – ТА; при разряде накопителя

используется для подогрева выходящего перед турбиной воздуха. Адиабатические НЭСВ имеют более высокий кпд аккумулирования, не требуют использования природного газа и обеспечивают масштабирование технологии на малые мощности.

Для этого используются в качестве резервуаров композитные баллоны высокого давления. Последнее обстоятельство увеличивает наземную часть энергоустановки. Проблема таких накопителей в том, что время сохранения энергии с высоким кпд определяется темпами остывания ТА, поэтому такие НЭСВ в отличие от своих более крупных собратьев должны найти применение в системах с быстро изменяющимся графиком нагрузки или генерирования – ВЭУ, регулирование в интеллектуальных сетях - smart grid.

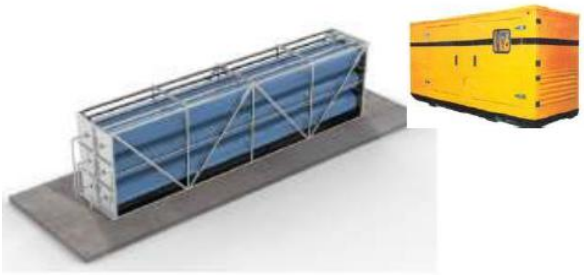


Рис.4. Адиабатический накопитель фирмы LightSail (США). Мощность 250 кВт, энергоемкость 1 МВтч, рабочее давление накопителя 200 атм.

Оптимизации структуры и стоимости адиабатических НЭСВ за счет совмещения в одном агрегате генератора и привода компрессора - «мотор-генератор» создает возможность работать как на сжатие воздуха, так и в генераторном режиме, на выдачу энергии в сеть.

Наиболее крупными НЭСВ в мире являются станции Макинтош (Алабама, США) и Хунторф (ФРГ, Евросоюз).

2.3.1.3 Энергетический баланс НЭСВ

На примере НЭСВ Макинтош [7] приведен энергетический баланс.

Для выработки 1 кВтч электроэнергии турбинами НЭСВ требуется затратить 0,67 кВтч электроэнергии и сжечь 1,17 (в пересчете на низшую теплотворную способность) кВтч природного газа [8].

По сути, обе станции являются гигантскими пилотными проектами по отработке технологических и экономических аспектов этого способа аккумулирования электроэнергии и не имеют прямого отношения к ВИЭ, взаимодействуя с ними через региональную электрическую сеть, но могут быть использованы для стабилизации сети при прохождении больших объемов энергии, получаемой от ВЭУ-парков.

2.3.2 Сглаживание неравномерности выработки электроэнергии от оффшорных ВЭУ

Предложен способ сгладить неравномерность выработки электроэнергии от ВЭУ (профессор С. Гарви, Университет Ноттингем, Великобритания) по которому ВЭУ, расположенные в открытом море, вообще не следует оснащать электрогенераторами. Лопасти ВЭУ должны быть полыми; внутри каждой из них должен свободно перемещаться тяжелый поршень. Когда лопасть опускается, поршень сдвигается к ее концу, а когда она поднимается вверх, поршень, наоборот, скользит по направлению к оси, сжимая вошедший через отверстия в корпусе воздух.

Сжатый воздух закачивается в специальные пакеты из тонкой и прочной синтетической ткани, плавающие на глубине 500 м. Эти хранилища, удерживаемые от разрыва давлением вышележащих слоев воды, служат своеобразными буферами, гарантирующими равномерную выработку электроэнергии даже при непредсказуемом ветровом режиме. Из подводных баллонов воздух подается по трубам к дополнительным компактным турбинам-генераторам. По оценкам, его запаса должно хватать для поддержания их вращения в течение нескольких дней даже при полном штиле. Ветротурбина такой «интегрированной возобновляемой энергетической системы на сжатом воздухе» — ICARES должна двигаться медленно и быть более 200 м в диаметре. Подводные хранилища энергии – «гроздья» огромных воздушных «подушек» диаметром по 20 м. Работы по проекту ведет компания «Nimrod Energy», основной задачей которой станет коммерциализация этой технологии. Системы ICARES на первых порах будут использовать для хранения энергии, выработанной энергоустановками других типов. ВЭУ от «Nimrod» могут появиться лет через 10—15.

2.3.3 Накопители энергии от ВИЭ на основе метана

Излишки электроэнергии, выработанные солнечными панелями - СП или ВЭУ-электростанциями, преобразуются в метан. Полученный газ можно хранить сколь угодно долго и использовать по мере необходимости с помощью уже существующей газовой инфраструктуры.

Пилотный проект, разработанный Центром солнечной энергии и водородных исследований (Штутгарт, ФРГ), в настоящее время реализуют компании Австрии и Германии. Система, построенная в Штутгарте, использует генерируемые с помощью СП и ВЭУ излишки энергии для электролитической диссоциации воды на кислород и водород. Полученный водород, соединяясь с подаваемым в систему углекислым газом, образует метан, который уже можно хранить и использовать для получения энергии в любое время. По оценкам ученых, эффективность подобного преобразования выше 60%.

В Германии, как и во многих других странах, уже существует вся необходимая инфраструктура —распределенная система газовых хранилищ большой емкости. Поэтому у данной технологии хорошие перспективы.

2.3.4 Накопители энергии на основе использования холода - «ночной ветер»

Сравнительно недавно было предложено сохранять электроэнергию, полученную от ВЭУ, меняя температуру в огромных складах-холодильниках, что практически не требует капитальных затрат. Разработан проект «Ночной ветер» (Болгария, Дания, Испания и Нидерланды), направленный на создание общеевропейской системы хранения энергии, вырабатываемой ВЭУ, основанной на использовании элементов уже существующей инфраструктуры. Идея проста: ночью, когда потребление электричества падает, а ВЭУ продолжают работать, вырабатываемую ими электроэнергию предлагается расходовать на то, чтобы понизить температуру в существующих холодильниках крупных продовольственных складов. Как показали оценки, достаточно снизить температуру всего на 1°С по сравнению с обычной нормой. Энергия будет «запасаться» в результате охлаждения многих тысяч тонн разнообразных продуктов, которые будут храниться в обычном режиме где-нибудь в Дании, Голландии или Франции. Днем же, когда потребление электричества многократно растет, все эти гигантские холодильники можно будет просто отключить от сети до тех пор, пока температура в них постепенно не поднимется на тот же 1°С, т. е. не вернется к привычному значению.

Колебания температуры всего на 1°С с периодом в сутки, если их применить на всех крупных холодильных складах Европы, будут эквивалентны появлению в общей энергосети супераккумулятора емкостью в 50 ГВт/ч. Действенность идеи авторы проекта продемонстрировали еще в 2007 г., установив рядом с одним из крупнейших холодильных складов в Бергене (Нидерланды) ветровую турбину и настроив электронную систему управления холодильником по описанному выше принципу.

Необычный аккумулятор и некоторые другие способы. Сегодня довольно высокая активность на Западе связана и с проектами хранения электроэнергии, выработанной, в частности, на весьма популярных здесь ВЭУ, в виде полученного с ее помощью водорода. Причем в таких проектах водород предлагается использовать не как топливо, а как временный энергоноситель. По оценкам экспертов, подобные схемы, которые могут быть весьма эффективными с энергетической точки зрения и вполне приемлемыми с точки зрения экологии, пока остаются слишком дорогими. Не прекращаются и исследования, связанные с различными технологиями закачки сжатого воздуха в подземные или подводные хранилища. Но, как уже отмечалось, у каждого из способов хранения энергии есть свои достоинства и недостатки. В связи с этим в последнее время появились даже призывы вернуться к, казалось бы, давно и всесторонне изученным

химическим аккумуляторам. Впрочем, не совсем обычным — расплавленным. Вообще-то так называемые горячие аккумуляторы придуманы тоже много лет назад. Известно немало их разновидностей, обладающих завидными удельными характеристиками. Только вот обеспечить необходимую для них рабочую температуру в сотни градусов по шкале Цельсия нелегко, так что это условие накладывает серьезные ограничения на возможные области их применения, а также на возможный срок их действия. Впрочем, в японской префектуре Аомори, к примеру, уже несколько лет действует комплекс из 17 крупных блоков серно-натриевых горячих батарей мощностью 34 МВт, которые подключены к сети через преобразователи переменного/постоянного тока. Данный комплекс входит в состав новой ВЭУ-фермы «Futamata», значительно сглаживая неравномерность выработки электроэнергии ВЭУ, позволяя удовлетворить дневной пик потребления и накапливая энергию ночью. Но новый аккумулятор, прототип которого создали американские ученые, по их оценкам, будет втрое дешевле лучших сегодняшних батарей, намного долговечнее их и главное — гораздо мощнее. Профессор Дональд Сэдовей и его коллеги из Массачусетского технологического института придумали оригинальное устройство для аккумулирования электрической энергии, которое, по их мнению, уже в недалеком будущем позволит использовать по ночам энергию, полученную от солнечных панелей (или энергию ветра в штиль). Такой аккумулятор, его объем — около 150 л, мог бы стать неотъемлемым атрибутом «зеленого» дома, обеспечивая все его потребности в энергии даже на пике потребления, а подзаряжался бы он от «непостоянных» ветряков и солнечных панелей. Аккумулирующая станция мощностью в 13 ГВт, достаточная для питания крупного города, заняла бы всего 6 га. Такая плотность мощности, как уверяют разработчики, эти батареи способны отдавать и принимать в 10 раз более сильный ток, чем все известные типы химических аккумуляторов. Понимая, что слишком сильный ток может с легкостью повредить устройство, попросту расплавив всю конструкцию, Сэдовей предложил: пусть расплавленное состояние будет нормой для всех частей батареи. В прежних горячих аккумуляторах помимо корпусов и контактов был еще один важный твердый (нерасплавленный) элемент — твердый электролит: специальная проводящая керамика, а в новом аккумуляторе твердых частей внутри нет вообще, кроме внешнего корпуса, все жидкое — и электролит, и электроды. Все элементы новой необычной системы не смешиваются между собой благодаря разной плотности, как не смешиваются масло и вода в покоящемся сосуде. А поскольку новая батарея призвана стать стационарным накопителем энергии, перемешиваться жидкостям вроде бы не от чего. Разработанный аккумулятор напоминает тугоплавкий «стакан» - корпус служит первым наружным контактом, накрытый крышкой - второй наружный контакт. Между ними — диэлектрик, а вокруг теплоизолирующая оболочка. На дно емкости поместили сурьму - первый внутренний электрод, следом сульфид натрия -

электролит, а сверху магний - второй внутренний электрод. Все компоненты — в расплавленном виде. При заряде слой электролита в таком аккумуляторе становится тоньше, а расплавленные электроды — толще. При разряде все происходит в обратном порядке: материал электродов–ионов частично переходит в электролит, так что центральный жидкий слой растет, а боковые — электроды — сокращаются.

Такая система, использующая довольно необычные для химических аккумуляторов принцип работы и конструкцию, как выяснилось, способна выдержать огромное число циклов зарядки и разрядки, многократно превышающее все, что могли продемонстрировать прежние батареи, а кроме того, может отдавать и принимать гигантские токи без каких-либо повреждений; в системе просто нечему выйти из строя. Наконец, все компоненты такого А оказались на удивление недорогими, так что установить подобные системы можно где угодно.

2.4 Кинетические накопители энергии - маховики

Многие эксперты считают весьма перспективным устройством для хранения энергии маховики. Так, специалисты американской компании «Beacon Power» разработали набор стационарных супермаховиков, предназначенных для подключения к промышленным энергосетям. Выполнены они из слоев сверхпрочных композитных материалов на основе углеродных волокон, позволяя доводить скорость их вращения до 22 500 об/мин. Маховики на магнитных подвесках вращаются в цилиндрических емкостях, внутри которых создан вакуум. Масса подобной конструкции может достигать 1 т. На стальном валу маховика (там же — внутри герметичного стального цилиндрического кожуха) расположен ротор обратимой электрической машины — мотора-генератора на постоянных магнитах, который и раскручивает маховик, запасая энергию, или отдает ее, вырабатывая электрический ток, при подключении нагрузки. КПД этого преобразования достигает 98 %.

Расчетный срок службы такой конструкции 20 лет, диапазон рабочих температур от —40 до +50 °С; выдерживает землетрясения с магнитудой до 7,6 по шкале Рихтера.

Принцип действия кинетического накопителя (КНЭ) или маховика основан на преобразовании кинетической энергии в электрическую и обратно. При заряде КНЭ идет раскрутка массивного колеса до высокой скорости. Высокая масса необходима для сохранения запасенной энергии в течение большего времени за счет инерции. При разряде КНЭ вращает привод генератора до тех пор, пока потери на трение и перевод кинетической энергии в электрическую полностью не погасят эту инерцию. Такие системы могут реагировать на изменение мощности в системе достаточно быстро и развивать высокую мощность, но для длительного аккумулирования большого запаса энергии требуются большие капитальные затраты

(строительство группы КНЭ и обеспечение необходимых мер безопасности, обычно связанных со строительством защитного купола над маховиком на случай его разрушения центробежными силами или срыва с оси). По области применения КНЭ близка к СК, но позволяет работать в диапазоне более высоких мощностей при меньшем уровне капитальных затрат. Основные исследования, проводимые в настоящее время, связаны с поиском новых материалов, способных обеспечить снижение цены КНЭ при сохранении приемлемых прочностных характеристик и уменьшение уровня потерь на трение, на раскрутку массивного тела, на сопротивление воздуха. Для решения последней задачи маховики располагают в вакуумированном объеме. За рубежом наибольших успехов в области создания крупных КНЭ добилась компания Beacon Power.

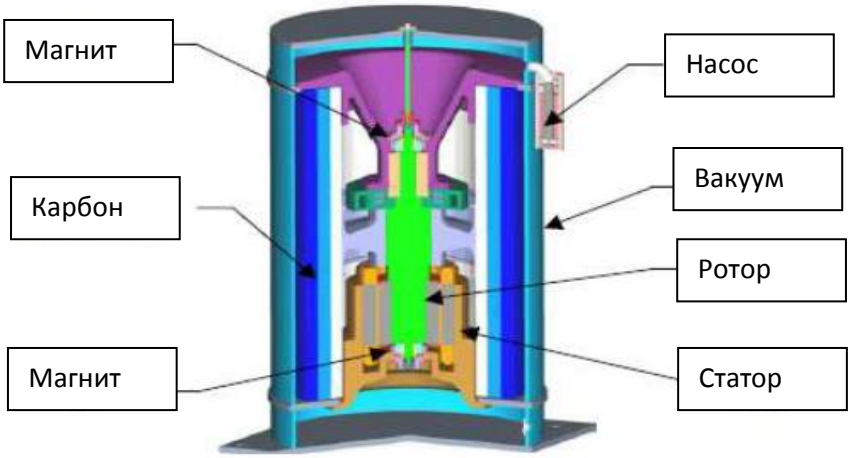


Рис.5. Разрез кинетического накопителя энергии Beacon Power.

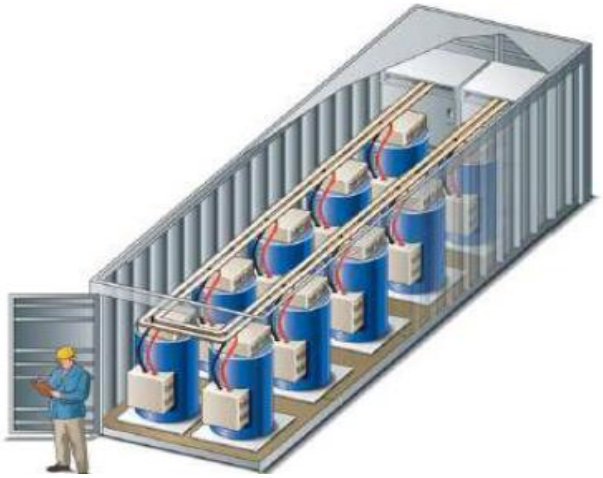


Рис.6. Блок-модуль КНЭ суммарной мощностью до 2,5 МВт. Энергоемкость – 250 кВт-час. Количество циклов «заряд-разряд» - до 50000. Саморазряд на трение – 2%.

В России с 2009 года основные усилия по разработке и выпуску опытных образцов КНЭ консолидирует компания «Русский

сверхпроводник». Компания «Русский сверхпроводник» разработала экспериментальный образец КНЭ и провела его испытания. Энергоемкость КНЭ составила порядка 4 МДж, в его составе была использована в качестве мотор-генератора трехфазная асинхронная электрическая машина мощностью 22 кВт. В ходе испытаний прошла проверку способность инновационного изделия работать в различных режимах, требуемых основными потенциальными потребителями накопителей. Среди них – режим работы в качестве быстродействующего динамического источника бесперебойного питания, режим рекуперации электрической энергии, режим «подхвата» провалов энергоснабжения потребителей (в т.ч. несколько просадок мощности подряд). Сценарии поведения систем энергоснабжения и потребления энергии имитировались встроенным в испытательный стенд специально разработанным программно-аппаратным комплексом. Кроме того, были проведены исследования систем и элементов КНЭ, в т.ч. системы контроля параметров и управления, на надежность и бесперебойность работы, обеспечение заявленных проектных характеристик, система снижения собственных механических потерь. Экспериментальный образец КНЭ показал высокую надежность в эксплуатации, обеспечение всех основных режимов работы в энергосистемах потребителей (регулирование частоты в сети, бесперебойное энергоснабжение ответственных потребителей, рекуперация энергии, совместная работа с базовыми энергоисточниками, в т.ч. работающими на ВИЭ-энергоресурсах). Так, например, такой важнейший показатель КНЭ, как скорость «подхвата» провалов и перерывов энергопитания (время включения в режим генерации электроэнергии и выхода на штатную мощность), составил менее 0,1 секунды, что подтвердило его высокие технические характеристики для эксплуатации в качестве высокоманевренной генерирующей мощности. Наилучшая ниша для применения КНЭ в системах с ВИЭ – сглаживание флуктуаций мощности при интеграции в сеть крупных ВЭУ-систем. Возможная схема применения КНЭ в составе ветродизельной станции приведена на рис.7.

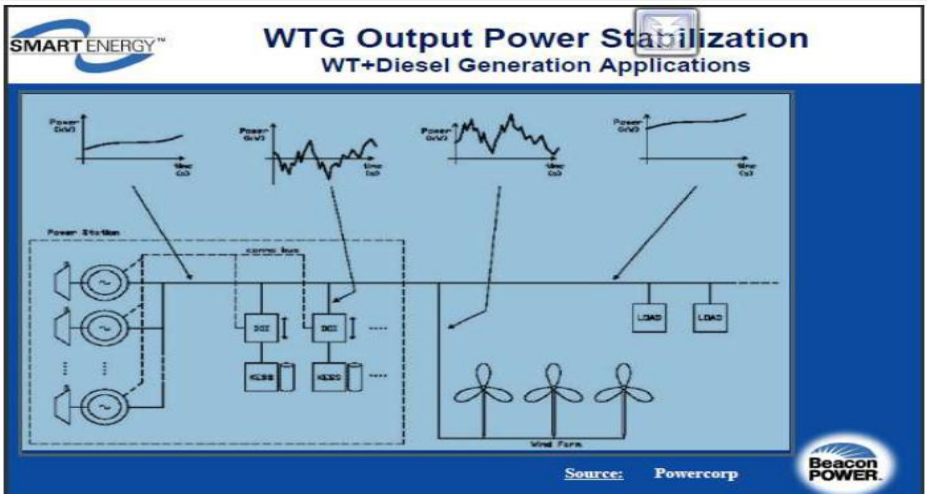


Рис. 7. Возможная схема применения КНЭ в составе ветродизельной станции

2.5 Электрохимические накопители электрической энергии

Электрохимические аккумуляторные батареи - АКБ характеризуются значениями порядка 1 кВт/кг. Типичное значение удельной энергоемкости АКБ около 0,3 МДж/кг, а у перспективного А - до 1,8 МДж/кг. Сохранность АКБ в рабочем состоянии - годы. Предельная энергоемкость накопителей на основе свинцово-кислотных аккумуляторов оценивается величиной 10^9 Дж, хотя и существуют проектные проработки накопителей на энергию 10^{11} Дж. Перспективные разработки должны обеспечить высокие удельные характеристики - 1 кДж/г и 2 кВт/см3. Удельные энергомощностные характеристики основных типов АКБ приведены на рисунке 8.

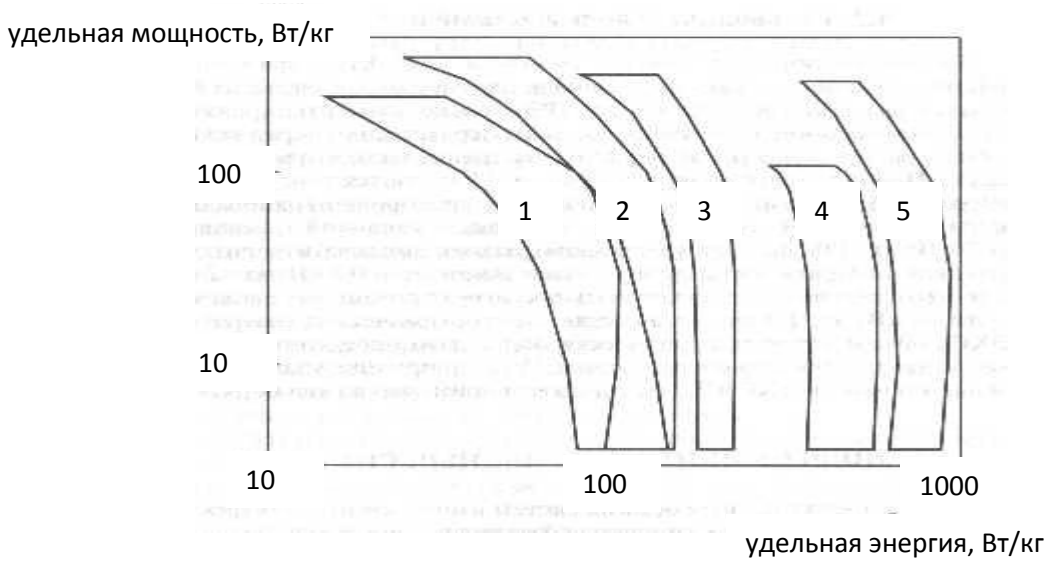


Рис. 8 - Удельные энергомощностные характеристики основных типов АКБ: 1 - свинцовые, 2 - никель-кадмиевые, 3 - никель-цинковые, 3 - хлор-цинковые, 5 - серно-натриевые

2.5.1 Свинцово-кислотные аккумуляторы.

Это наиболее изученный и освоенный тип накопителей как для систем с ВИЭ, так и многих других применений. СКА можно встретить и на крупных ЭС (источники аварийного питания собственных нужд), и в легковых автомобилях (стартерная батарея, бортовое электропитание). Активные вещества А сосредоточены в электролите и положительных и отрицательных электродах, а совокупность этих веществ называется электрохимической системой. В СКА-батареях электролитом является раствор серной кислоты, активным веществом положительных пластин — двуокись свинца РЬО2, отрицательных пластин — свинец РЬ. Схема А представлена на рис. 9.

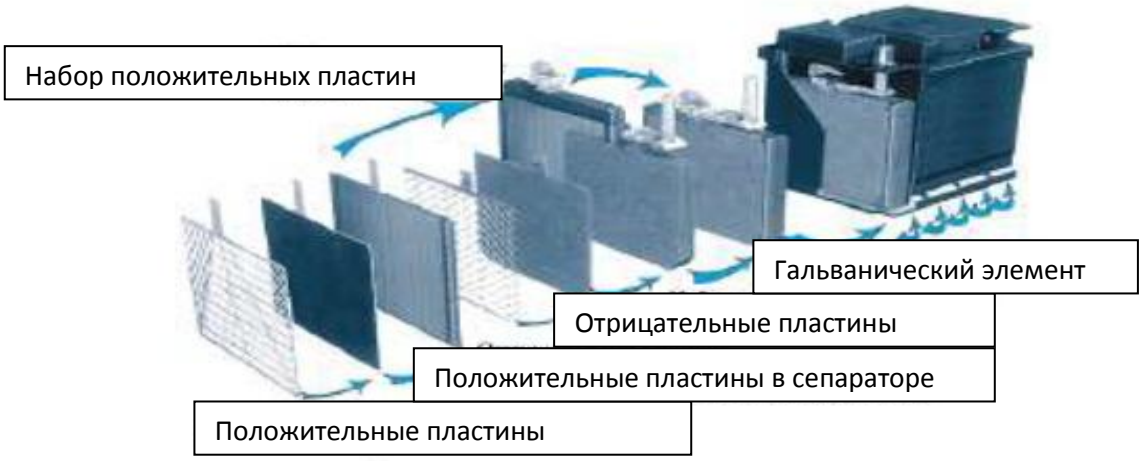


Рис. 9. Составные части сернокислотных аккумуляторов.

СКА различаются химическими добавками к материалу положительных и отрицательных пластин, состоянием электролита и областями применения.

К недостаткам СКА следует отнести небольшую глубину разряда (до 30-50%), чувствительность к температуре окружающей среды, низкие удельные характеристики (порядка 20-30 Втч/кг) и относительно низкий ресурс (500-800 циклов при глубине разряда 40-50% для большинства производителей).

Достоинством СКА является именно отработанная технология их массового производства, что существенно снижает их стоимость – данный вид накопителей в расчете на единицу оборудования является самым дешевым.

На рынке появились А с иммобилизованным в полимерной матрице (AGM) и гелевым (Gel) электролитом. Такие аккумуляторы уже могут эксплуатироваться в любом положении и не требуют обслуживания. Общий термин для данного типа систем – герметизированные А. Они снабжены рекомбинаторами водорода, превращающими выделившийся в процессе электролиза газ в воду, и, таким образом, компенсирующим потери электролита при перезаряде. Тем не менее, длительный или быстрый перезаряд способен привести к взрыву батареи из-за перегрева и повышенного газовыделения.

Помимо иммобилизации электролита, в обоих типах по-разному модифицированы электроды. В СКА типа AGM повышена устойчивость к режиму так называемого «жесткого буфера», когда батарея длительное время находится в режиме постоянного подзаряда – энергия постоянно протекает «насквозь» - от зарядного устройства к потребителю. Этот режим характерен для источников аварийного питания и допускает мгновенный подхват нагрузки при исчезновении питания от сети. Средний срок службы СКА, используемых в таком режиме на базовых станциях сотовой связи – от 3 до 5 лет.

Гелевые А оптимизированы для постоянных глубоких зарядов и разрядов, поэтому они наиболее часто применяются в системах с ВИЭ. Рядом зарубежных компаний выпускаются специальные «солнечные» серии А номинальным напряжением 2, 6 и 12 В для использования в солнечных энергоустановках «Sonenschein», «Delta», «Hoppecke», «Fiamm», «Rittar», «Prosolar», «Haze» и др.

В Пуэрто-Рико в 1993 году построен накопитель электрической мощностью 20 МВт и энергоемкостью 14 МВт*ч на основе СКА. Система создавалась как полигон для тестирования СКА в условиях крупной установки, значительное внимание уделялось вопросам контроля температуры и разбалансировки характеристик отдельных элементов в составе батареи [*11*] СКА остаются наиболее распространенным решением по буферному аккумулированию электроэнергии, когда речь идет о малых ЭУ с ВИЭ (индивидуальные жилые дома, станции сотовой связи). Можно отметить доминирование СКА в источниках резервного и бесперебойного питания самого разного назначения – от крупных тяговых подстанций железных дорог до ИБП для персональных компьютеров. Такая ситуация объясняется во-первых, консерватизмом отрасли, привыкшей к отработанным решениям, а во-вторых – относительно низкой стоимостью СКА.

2.5.2 Никель-кадмиевые и никель-металлогидридные аккумуляторы.

В НКА анодным электродом является гидрат дигидроксида никеля Ni(OH)2, смешанный для повышения проводимости с графитом, катодным электродом — гидрат закиси кадмия Cd(OH)2 или металлический порошок кадмия Cd. Электролит — водный раствор калиевой щелочи KOH плотностью 1,2 г/см3. Напряжение холостого хода НКА около 1,37 В, удельная энергия около 50 Вт·ч/кг [13].

Современные промышленные НКА могут служить до 20-25 лет. НКА – единственный вид А, которые могут храниться разряженными. Для данного типа А также характерна устойчивая работа при пониженных (-20°С) температурах и малый нагрев при заряде и разряде высокими токами. Основным недостатком НКА является так называемый «эффект памяти» - когда зарядке подвергается не полностью заряженный А, его рабочее напряжение снижается из-за формирования дополнительного двойного электрического слоя на электродах, как бы «запирающего» остаточную емкость. Многократное повторение этого явление приводит к выходу А из строя, поэтому НКА целесообразно применять в системах, для которых характерен глубокий разряд. Работа НКА в буферном режиме не рекомендуется. Во избежание разбаланса А батареи при хранении необходима система контроля и выравнивания напряжений, в противном случае А внутри батареи будут обмениваться между собой зарядом малыми токами, что приведет к их деградации за счет эффекта памяти. Контроллер

заряда для таких А должен периодически осуществлять циклы полного заряда-разряда для сохранения характеристик. Другим существенным недостатком является применение в элементах токсичного кадмия, который требует специальных технологий утилизации НКА и отходов их производства. Данный тип А нашел широкое применение в бортовых источниках питания различных транспортных средств, от электромобилей и радиоуправляемых моделей до авиации В системах с ВИЭ широкого применения не нашли, хотя отмечено применение в составе ветродизельных энергоустановок для сглаживания неравномерностей генерации и потребления (рис.10). Кроме того, ряд инверторов-зарядных устройств ведущих производителей, работающих над устройствами управления и сопряжения систем с ВИЭ (SMA, Victron Energy, Studer Innotech) имеет специальные алгоритмы заряда и разряда НКА, включение которых осуществляется специальным переключателем при настройке инвертора, либо в процессе его программирования.

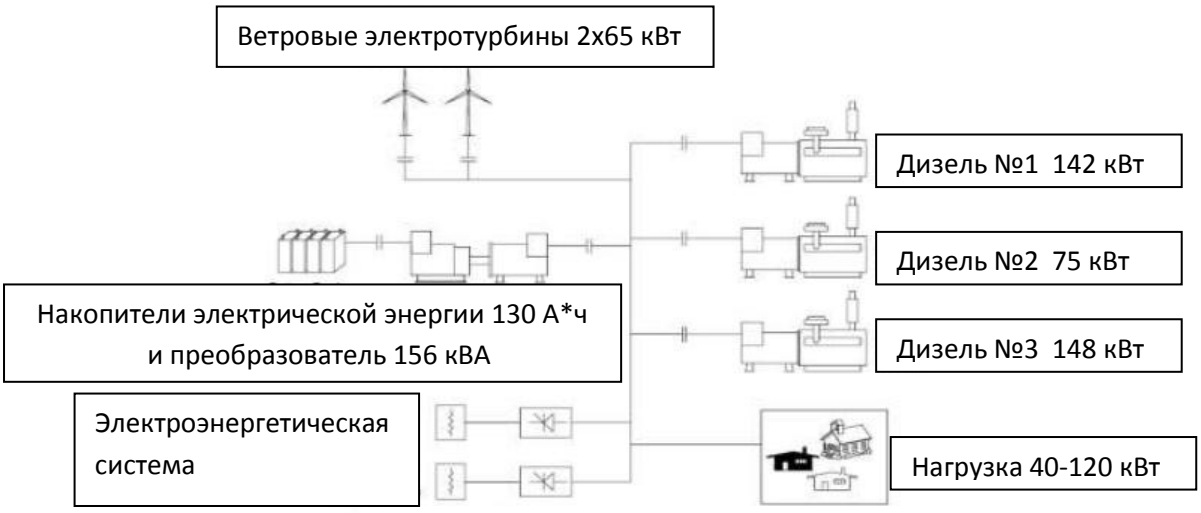


Рис.10. Пример применения НКА в составе ВЭУ-дизельной станции на Аляске

2.5.3 Литий-ионные аккумуляторы.

Литий-ионные аккумуляторы – ЛИА находят все большее применение в электротранспорте, портативных источниках питания, космической и авиационной технике. Принцип действия ЛИА показан на рис. 11.

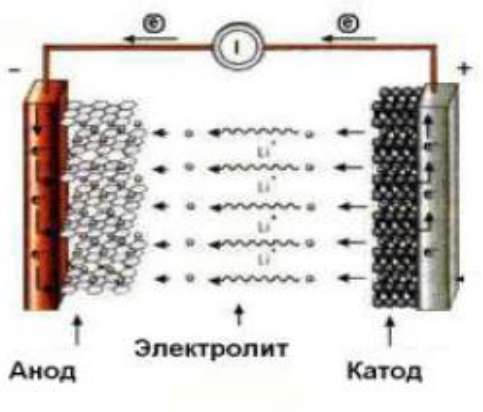


Рис.11. Принцип действия ЛИА

Для ЛИА характерны высокая энергоемкость (см. табл. 1), глубокие циклы заряда-разряда (70-80%), отсутствие эффекта памяти. В то же время ресурс и стоимость ЛИА зависят от типа электрохимических систем, применяемых на катоде и аноде, а также от температуры и режимов эксплуатации. Повышение температуры при эксплуатации или даже хранении существенно снижает ресурс и увеличивает скорость саморазряда [15]. Примеры катодных систем приведены в таблице 1 [16, 17]. Видно, что системы с высокой энергоемкостью имеют меньший ресурс и допускают разряд меньшими токами. Применение в качестве анодного материала наноструктурированного титаната лития (Li4Ti5O12) позволяет, согласно [*18*] увеличить ресурс до 9000 циклов, но со снижением энергоемкости до 90 Вт*ч/кг.

Таблица 1. Некоторые свойства ЛИА

Катодная система	Удельная энергия, Вт*ч/кг	Удельная мощность, кВт/кг	Удельная стоимость, $/Вт*ч	Ресурс, циклов*	Применение
$Li_{(1-x)}Mn_2O_4$	150	0,8-1	1-3	1500	Источники бесперебойного питания, электротранспорт
$LiCoO_2$	180	0,3 – 0,4	2,8-5	1200	Потребительская электроника, электротранспорт
$LiFePO_4$	110	2-3	0,4-2	Более 2000	Электротранспорт, стационарные системы

*-существенно зависит от типа применяемой анодной электрохимической системы

Для нормальной и безопасной работы ЛИА-батареи необходима система, регулирующая токи заряда и разряда, контролирующая температуру на отдельных А и, главное, выравнивающая их напряжение в процессе заряда и разряда. Без такой системы может возникнуть ситуация, когда вся батарея начинает работать на заряд единственного А с минимальным напряжением, что может привести к его заряду, пожару и взрыву. Системы контроля и управления обычно классифицируются как активные и пассивные. Активные - осуществляют отключение и дозарядку каждого А индивидуально, в то время как пассивные снижают напряжение на наиболее заряженных А за счет пропускания тока через балансировочный резистор, включенный параллельно каждому А. Примеры схемотехнических решений приведены на рис.12.

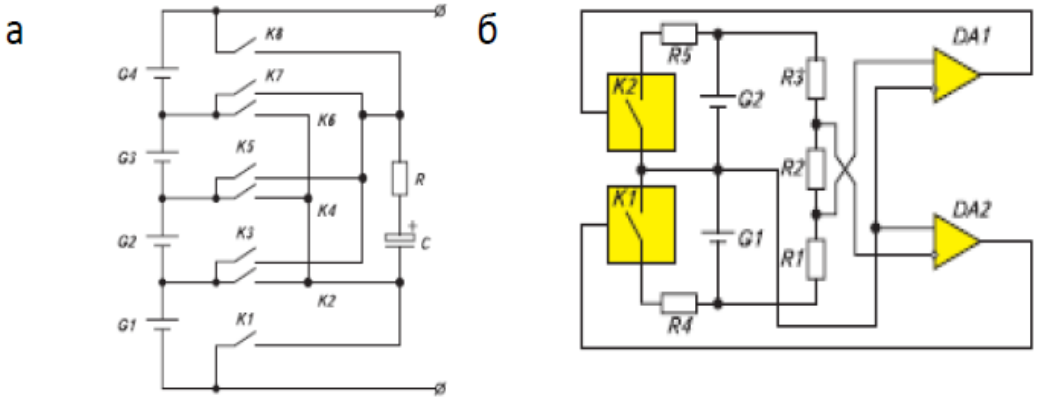


Рис.12. Примеры схемотехнических решений активной (а) и пассивной (б) систем балансировки ЛИА.

Пассивные системы более просты и дешевы, но суммарный кпд батареи в этом случае будет ниже за счет рассеяния части энергии в тепло. Это рассеяние будет тем выше, чем больше изначальный «разбег» напряжений индивидуальных А, собранных в батарею, поэтому предварительно А подвергают входному контролю с целью их сортировки по партиям с близкими зарядно-разрядными характеристиками и энергоемкостью.

Несмотря на высокие удельные характеристики, до середины 2000-х годов ЛИА применялись в основном в портативных электронных устройствах. Использование в качестве основного катодного материала дорогого и взрывоопасного кобальтита лития являлось главным ограничением на число элементов в батарее. К тому же такие батареи требовали сложной системы контроля и управления, не допускавшей:

А) чрезмерного разогрева элементов;

Б) высоких значений токов заряда и разряда;

В) существенной разницы напряжений между отдельными элементами батареи.

Нарушение любого из этих требований обычно ведет к взрыву элемента. Понятно, что в таких условиях о крупных накопителях на основе ЛИА не могло быть и речи. Ситуация начала кардинально меняться с появлением и отработки новых катодных материалов – оливиноподобных структур и шпинелей, что позволило повысить безопасность, ресурсные характеристики и понизить стоимость батарей без существенного снижения энергоемкости. Применение титаната лития на аноде А позволило расширить температурный диапазон и достичь ресурса более 6000 циклов при существенной глубине разряда высоких значениях токов. В настоящее время целый ряд компаний, ориентированных на производство ЛИА для электромобилей, начинает выпуск систем ЛИА для бесперебойных, резервных и аварийных нужд, а также буферного аккумулирования электроэнергии. Высокие удельные характеристики ЛИА позволяют разместить такие системы в стандартных морских или автомобильных контейнерах.

В 2003 году в Массачусетском технологическом институте предложено использовать ферро-фосфат лития (LiFePO4) в качестве катодного материала. Это доступное и нетоксичное соединение, в отличие от использующихся в А кадмия и никеля, всегда считалось очень перспективным для промышленности.

Рис. 13 Устройство ЛИА с литий-ферро-фосфатным катодом

Ферро-фосфат лития оказался очень удачным материалом для использования в А. Он способен отдать практически весь накопленный литий, оставаясь устойчивым. При этом сохраняется главное свойство ЛИА – большая удельная емкость. Таким образом, третье поколение ЛИА стало безопасным, высокоэнергоэффективным и экологичным.

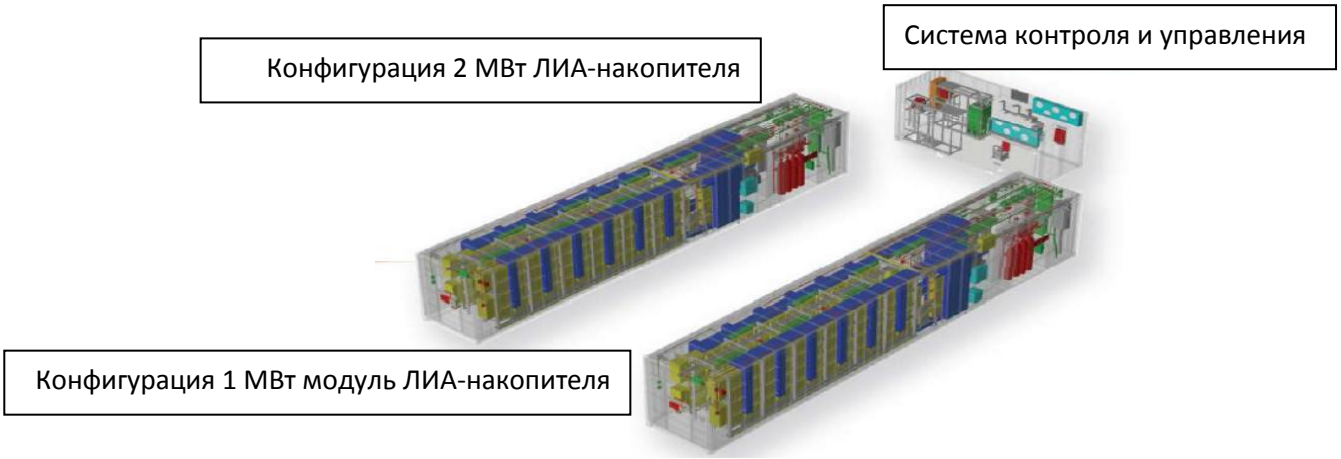


Рис. 14 Буферный/резервный ЛИА-накопитель энергии компании Altairnano емкостью 250 кВтч и мощностью 1 МВт

Следует отметить, что система компании Altair-Nano тестировалась на Гавайских островах в качестве буферного накопителя для ВЭУ мощностью 1 МВт.

2.5.4 Натрий-серные аккумуляторы

Принцип действия натрий-серного аккумулятора - НСА показан на рис. 15. Во многом данная электрохимическая система напоминает литиевую – в разряженном состоянии натрий образует с серой химическое соединение (полисульфид натрия), в заряженном – сера и натрий представлены в виде чистых веществ, разделенных керамической мембраной. Есть ряд существенных отличий – электролит в данной системе керамический, что обуславливает высокую рабочую температуру аккумулятора (290-360ºС). В японских системах, разработанных и серийно выпускаемых компанией NGKInsulators LTD, температура А в режиме хранения поддерживается за счет токов саморазряда. Так как падение температуры приводит к замерзанию реагентов и резкому снижению ионной проводимости электролита, в конструкции предприняты дополнительные меры по теплоизоляции батареи. Помимо теплоизоляции внешнего корпуса применяются такие меры как откачка воздуха из внутреннего объема батареи, где расположены отдельные А, и покрытие внутренних стенок этого объема фольгой (экранно-вакуумная теплизоляция) [22]. Теоретическая энергоемкость данной системы может достигать 925 Вт*ч/кг, однако в реальности достигнуты гораздо меньшие цифры – 150-100 Вт*ч/кг [23]. Достигнутые на практике ресурсные характеристики демонстрируют значения от 2000 до 4000 циклов при глубине разряда до 80-90%. Следует отметить широкое применение подобных систем в Японии и США, как для возобновляемой, так и централизованной энергетики.

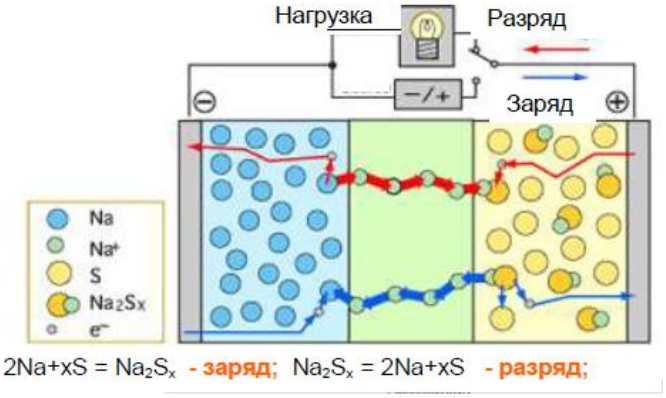


Рис. 15. Принцип действия NaS аккумулятора.

Рис.16. Примеры применения НСА для регулирования работы ВЭС мощностью 51 МВт (вверху, мощность накопителя 34 МВт) и подстанции централизованной электросети в США (внизу). Фото представлено на сайте компании NGK Insulators LTD (Япония).

Большие успехи в создании высокомощных НСА достигнуты в Японии в Tokyo Electric Power Company (TEPCO) и NGK Insulators, LTD. Перспективы НСА обусловлены целым рядом их достоинств: высокая удельная энергия и мощность, хорошая обратимость и большой ресурс, отсутствие побочных реакций, герметичность и большой срок сохраняемости, дешевизна и доступность основных реагентов – натрия и серы. Существенный недостаток: относительно высокая рабочая температура, которая определяет области возможного применения.

Несколько модулей за последние годы были инсталлированы в США, в основном для стабилизации работы ВЭС (рис. 16) и крупных электрических сетей. Успешные испытания привели к тому, что в ноябре 2009 года, несмотря на финансовый кризис, General Electric и NGK начали строительство завода в США по производству НСА.

Начатые в 80-ых годах подразделениями Минатома СССР работы во многом по духу и целям соответствовали таковым в Японии – накопители предполагалось массово использовать в рамках программы по ветроэнергетике и для регулирования графиков выдачи мощности АЭС.

2.5.5 Импульсные НЭ-электроаккумуляторы

Из отрывочных полурекламных публикаций известно о разработках А, специально предназначенных для работы в импульсном режиме разрядов длительностью порядка 0,01-1 с. Свинцовые пластины выполняются из тонких пластин с развитой поверхностью, поэтому удается существенно повысить плотность тока и увеличить мощностные характеристики до 100 кВт/кг массы А при сохранении удельных энергетических характеристик на уровне 1 кДж/кг**.**

2.5.6 НЭ - аккумуляторные батареи большой энергоёмкости

Таблица 2.

Тип электролита	Объект	Мощность, МВт	Время работы, мин	Год установки
Серно-кислотный	BEWAG, электроснабжение Зап. Берлина	8.5	20	1990
	Резервирование и поддержание частоты маломощной сети Пуэрто-Рико	20	15	1998
	Чинно (Калифорния), различные объекты для исследования возможностей регулирования нагрузки, частоты, напряжения и реактивной мощности	10	240	1986
Никель-кадмиевый	GVEA, обеспечение бесперебойного электроснабжения прибрежных районов Аляски вблизи г. Анкоридж	40	15	2003
Серно-натриевый	Ветряная станция Rokkacho, Япония. Всего внедрено – 100 объектов.	34	600	2008 (самый крупный)
Цинк-бромный	ПС Detroit Edison Site, Мичиган. Для поддержания напряжения собственных нужд	0,4	480	2001
Ванадиум-редоксный	Один из крупных высокотехнологичных заводов в Японии. Выравнивание графика нагрузок	1,5	60	2001

2.5.7 Проточные редокс-накопители

Принцип работы НЭ заключается в том, что на одном из электродов протекает обратимая реакция окисления одного из элементов пары с передачей электрона (через внешнюю цепь) и протона (через ионообменную мембрану) на второй электрод, где происходит обратный процесс – восстановление второго элемента, находящегося в растворе. Энергоемкость НЭ определяется запасом растворов солей, а мощность – количеством и площадью электрохимических ячеек. Перезарядка системы производится за счет запуска процесса в обратную сторону (с подачей внешнего напряжения на ячейки) или перезаправкой емкостей свежими растворами.

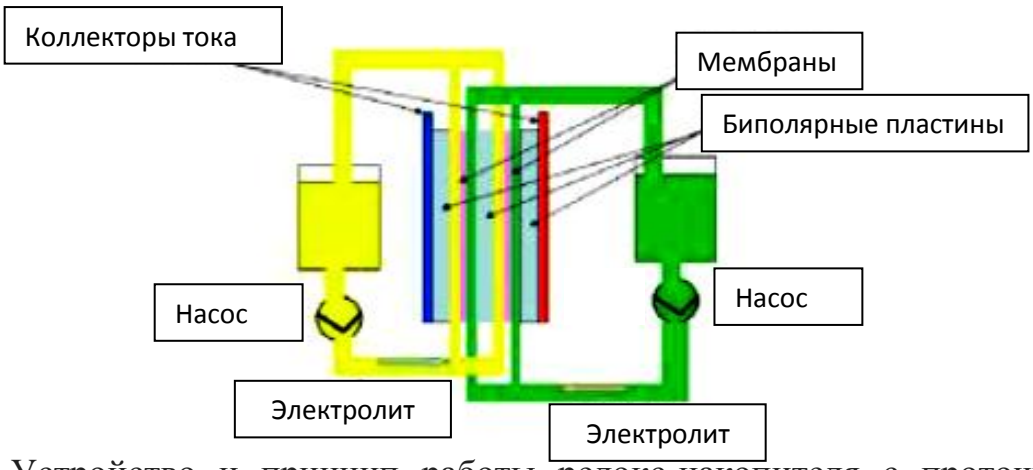


Рис. 17. Устройство и принцип работы редокс-накопителя с проточным электролитом (2 электрохимические ячейки, на примере пары V|V).

Редокс-накопитель состоит из емкостей с электролитами, вспомогательных узлов - насосы для прокачки электролита по контурам анодов и катодов и обратимых электрохимических ячеек с твердополимерным электролитом [34].

В настоящее время коммерческого применения достигли три электрохимические системы: Fe|Cr (Deeya Energy), Zn|Br (Premium Power, ZBB), V|V (Golden Energy Fuel Cell, Prudent Energy, Cellstrom Power).

Первая и последняя системы используют растворы солей в жидкой фазе, в то время как в системах Premium Power и ZBB в процессе заряда выделяется газообразный бром. Возможность достижения больших давлений и токсичность самого газа побудили разработчиков обеспечить безопасность системы в режиме хранения путем связывания газообразного брома в составе металл-органического соединения. НЭ выпускаются в мобильном варианте (рис. 18).

Рис. 18. Мобильный накопитель электрической энергии на основе электрохимической системы Zn|Br (TransFlow2000, 2.8 МВтч, 500 кВт, компания Premium Power, США)

Наибольшее распространение получила система V|V. В ванадиевых и других редокс-накопителях используются углеродные нетканые материалы с развитой поверхностью в качестве электродов, углерод-полимерные композитные биполярные пластины и перфторированные ионообменные мембраны типа Nafion - в случае сернокислотного электролита.

Катализаторы на электродах отсутствуют, хотя в ряде исследований, направленных на повышение плотностей тока, рассматриваются наноструктурированные системы на основе рутения и палладия [35].

Напряжение разомкнутой цепи на элементе для ванадиевой системы при концентрации ванадия в растворе 1М составляет 1,26 В. Кпд системы составляет 75-80% [37]. Стоимость таких систем составляет (30 – 100) у.е./кВт установленной мощности и (1-3) у.е./кВт*ч в зависимости от мощности и энергоемкости системы [10].

Преимущества НЭ проявляются при сезонном регулировании работы энергосистем – разделение мощности и емкости позволяет сформировать запас электролитов в летнее время для последующего его использования на покрытие пиков нагрузки в зимнее время. Предельная концентрация солей ванадия в настоящее время ограничивает энергоемкость системы 15-20 Вт*ч/кг, что сравнимо со СКА [38]. Несмотря на это, были разработаны и испытаны транспортные энергоустановки с применением ванадиевой системы [37].

В таблице 3 представлен референс-лист станций с ВРБ.

Раздельное наращивание мощности и емкости открывает широкие возможности для аккумулирования электроэнергии в течение длительных периодов отсутствия первичного источника.

Наиболее интересным применением ВРБ является реализованный (Тасмания) энергетический комплекс, включающий в себя ВЭУ общей мощностью 2,5 МВт, ДГУ и ВРБ (200 кВт, 4 ч работы, пиковая мощность до 400 кВт). В результате удалось сократить потребление дизельного топлива более чем на 1 млн. литров в год и довести долю ВИЭ в энергобалансе до 50%. Данный проект можно считать своеобразным прообразом интеллектуальной сети, объединяющей ВИЭ, традиционный источник и НЭ большой мощности [41].

2.6 Гальванические и топливные элементы

Гальванические и топливные элементы - это ХИТ одноразового действия. Наиболее высокие удельные параметры достигаются в так называемых резервных элементах (РЭ). Такие элементы хранятся в нерабочем состоянии и активируются непосредственно перед включением на нагрузку. РЭ работают кратковременно (максимум несколько часов).

Таблица 3.

№№	Наименование и расположение установки	Мощность, кВт	Запас энергии, кВт*ч	Примечание
1	King Island, одноименный остров у берегов Новой Зеландии	250	1000	Сглаживание пиков и регулирование мощности в системе энергообеспечения острова (первичные источники – газопоршневые установки и ветротурбины
2	Castle Valley, США, штат Юта, оператор - PacifiCorp	250	2000	Регулирование мощности и сглаживание пиков в локальной энергосистеме
3	Sapporo (Япония)	4000 (6000 в пике)	6000	Буферный накопитель для ветровой электростанции, подключенной к сети
4	Университет Stellenbosh, ЮАР, Кейптаун	250	500	Полевые испытания
5	Institute of Applied Energy, Япония	170	1020	Буферный накопитель для ветровой электростанции, подключенной к сети
6	Tottori Sanyo Electric, Япония	3000	1,5 сек. работы	В системе молниезащиты
7	Tottori Sanyo Electric, Япония	1500	1500	Сглаживание пиков
8	Obayashi Corporation, Япония	30	240	Буферный накопитель для автономной солнечной энергоустановки
9	Kwansei Gakuin University, Япония	500	5000	Сглаживание пиков
10	Centro Elletrotecnico Sperimentale Italiano, Италия	42	84	Сглаживание пиков
11	Kashima Kita Power Station, Япония	200	800	Регулирование мощности
12	Sumitomo Densetsu Co, Ltd, Япония	100	800	Регулирование мощности
13	Tomamae Wind Villa, Япония	4000	6000	Буферный накопитель для ветровой электростанции, подключенной к сети
14	Sorne Hill Wind Farm, Ирландия	2000	6000	Буферный накопитель для ветровой электростанции, подключенной к сети. Не достроена.

Наиболее энергоемкими в ряду ХИТ являются топливные элементы - ТЭ. Самыми мощными являются кислородно-водородные и гидразинные ТЭ, (типичные значения удельной мощности 50-70 Вт/кг). За счет увеличения расхода топлива и уплотнения упаковки элемента достигнута удельная мощность ~0,2 кВт/кг. Считается, что в перспективе может быть достигнут уровень удельной мощности ~4 кВт/кг. ТЭ входят в состав электрохимических генераторов - ЭХГ, объем которых практически полностью определяется размером вспомогательного оборудования. По этой причине удельные объемные мощности ЭХГ и ТЭ различаются примерно на два порядка.

2.6.1 Водородный цикл

Водородно-воздушные топливные элементы (ТЭ) рассматривались как перспективные энергетические системы для различных применений в силу высокого кпд (50-55%) и отсутствия вредных выбросов в случае низкотемпературных систем – щелочных и твердополимерных топливных элементов [24]. Принцип действия ВВТЭ показан на рис. 19 [25]. На катализаторе анода происходит реакция разложения молекулы водорода на атомы и последующей их ионизации. Протоны движутся к катоду через тонкую полимерную мембрану, представляющую собой композиционный материал на основе фторопласта, включающий в себя сернокислые функциональные группы, которые, собственно, и обеспечивают транспорт протонов. Электроны также попадают на катод через внешнюю цепь. На катодном катализаторе происходит реакция восстановления кислорода воздуха до воды. Важно отметить, что ТЭ генерируют электрическую энергию до тех пор, пока на анод и катод подаются топливо и окислитель. То есть мощность и энергоемкость данной системы независимы: – энергоемкость обеспечивается объемом запасенных топлива и окислителя, а мощность – количеством ТЭ в батарее и их площадью. Типичные значения рабочего напряжения единичной ячейки составляют 0,6-0,7 В, а токи – 200-400 мА/см2.

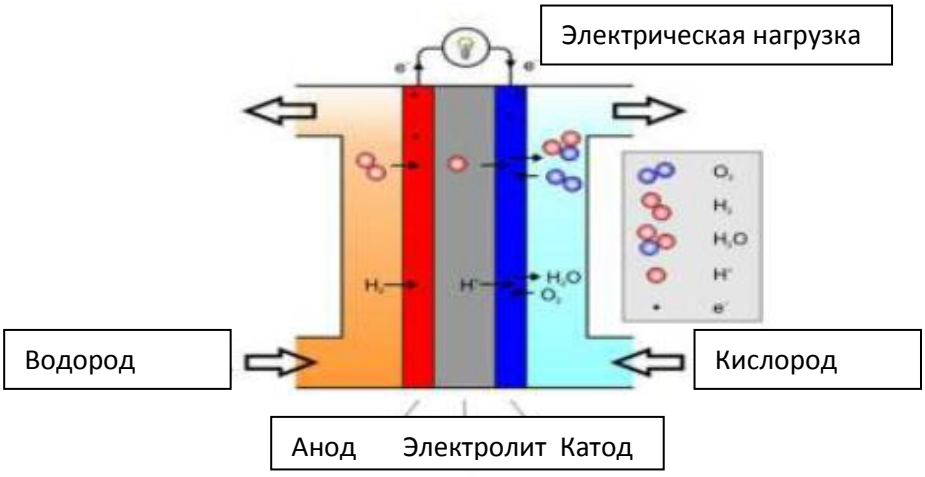


Рис.19. Принцип работы ТЭ с твердополимерным электролитом.

Источником быстрой деградации ТЭ являются примеси в газах или воде. Особую опасность представляют соединения углерода, серы, хлор (отравляют катализатор) и ионы железа, кобальта, никеля (подавляют проводимость мембран-электролитов). Поэтому при использовании данных систем необходима дополнительная очистка воды, то есть в состав установки с водородным циклом включается дистиллятор (для щелочных электролизеров) или станция получения деионизированной воды (для систем с твердым полимерным электролитом). Также необходимо осушение получаемых электролизом газов во избежание коррозии емкостей для их хранения (газгольдеров). Принципиальная схема реализации водородного цикла с ТЭ представлена на рис. 20. При избыточной генерации базового источника или в часы снижения потребления электроэнергии генерируемые водород и кислород проходят необходимые процедуры очистки, осушки и компремирования и запасаются в газгольдерах. При необходимости поддержки базового источник энергии, а газы подаются в топливные элементы [26].

В ОИВТ РАН длительное время ведутся работы по созданию парогенераторов для сжигания водорода в кислороде при высоких температурах. Таким образом, открывается возможность для замены ненадежных и дорогостоящих ТЭ на отработанные парогенераторы и паровые турбины [27]. Близкая модификация водородного цикла с паровой турбиной предложена компанией Nature’s Electric Inc. (США) [28]. Запасенный водород направляется в каталитический бойлер, где преобразуется в пар, затем срабатываемый в паровой турбине. Минусами схемы является относительно длительный запуск турбины, и, главное, ее относительно невысокий кпд в диапазоне мощностей ниже 500 кВт [29].

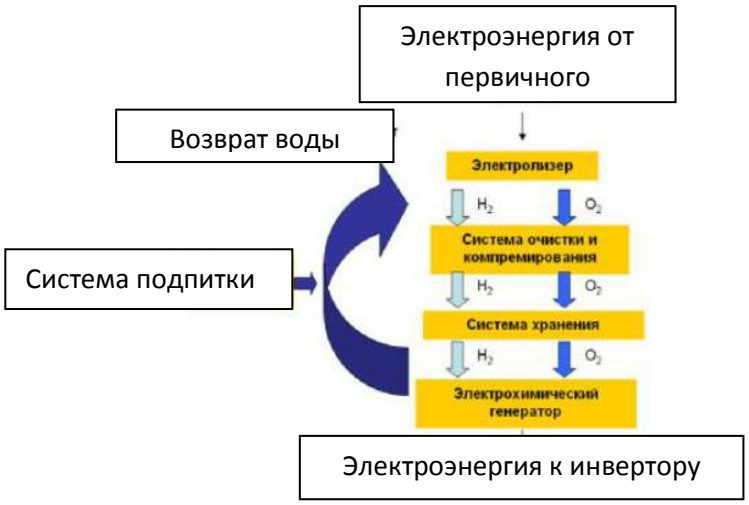


Рис. 20. Принципиальная схема реализации водородного цикла аккумулирования электроэнергии с использованием электролизера и ТЭ

Австрийской фирмой Jenbacher предпринимались попытки создания газопоршневой энергоустановки (ГПУ), использующей водород в качестве

топлива [30]. Учитывая, что при мощностях менее 1 МВт кпд ГПУ выше, чем в паротурбинной схеме, открываются возможности для применения тепловых машин в составе водородного цикла и при относительно низких мощностях. Важно отметить то обстоятельство, что в водородном цикле мощность и энергоемкость накопителя разделены – мощность определяется параметрами генератора (ТЭ или теплового двигателя), а емкость – запасами газов-реагентов. Это позволяет гибко варьировать параметры накопителя, а также практически полностью исключить явление саморазряда. В мире уже реализован ряд проектов, связанных с ВИЭ и водородным циклом как на основе ВВТЭ, так и на основе теплового двигателя. Nature's Electric реализовала проект ветропарка в штате Техас, в котором накопление избыточной энергии происходит в виде в композитных газгольдерах водорода и кислорода, полученных в процессе электролиза воды. Несмотря на то, что достаточно мощный ветропарк подключен к сети штата, сброс энергии туда бывает не всегда целесообразен из-за гибкой системы тарифов на закупку электроэнергии, действующей в США. Поэтому мощный накопитель позволяет продавать максимум энергии по наиболее выгодной цене. Системами с водородным циклом на основе ТЭ занимается ряд компаний за рубежом, например Heliocentris. Подобный опыт в рамках одной из европейских программ по ВИЭ приобрела и голландская Nedstack Fuel Cell Technology B.V. Демонстрационная система на основе ФЭП и водородного цикла смонтирована также в районе Берлина Адлерсхоф. Все указанные проекты являются демонстрационными, мощность установок обычно не превышает 5 кВт. Это обусловлено, во-первых, европейскими особенностями применения солнечных батарей (системы для индивидуальных жилых домов с соответствующей мощностью), а во-вторых – высокой стоимостью и низким ресурсом ТЭ. В Италии в 2003 г. (Agrate) была запущена в опытную эксплуатацию пилотная СВЭУ, включающая в себя блок солнечных батарей, щелочной электролизер, ТЭ ТПЭ, СКА, систему управления и ряд вспомогательных систем. Фотографии основных узлов пилотной СВЭУ приведены на рисунках 21…24.

Рис. 21 Блок солнечных батарей (36 модулей PW1000) пилотной автономной СВЭУ (Agrate, Италия)

Рис. 22. Электролизер (3,6 кВт, 30 элементов по 150 см3, рабочее давление 30 бар) пилотной автономной СВЭУ (Agrate, Италия)

Рис.23. Хранилище водорода (4 м3, 10 бар) пилотной автономной СВЭУ (Agrate, Италия)

Установка была запущена в эксплуатацию в начале 2004 года. Это первый в мире реализованный на практике проект экологически чистого дома, энергоснабжение и горячее водоснабжение которого обеспечивается СВЭУ. Дом построен на территории инженерного факультета Малазийского Кебангсанского университета как часть нового исследовательского центра, занимающегося исследованиями по применению ТЭ. Дом и его инженерные системы разработаны профессором Kamaruzzaman Sopian и архитектором Shah Jaafar на средства Министерства науки, технологии и окружающей среды Малайзии. Площадь дома около 100 м^2, на его строительство затрачено около у.е.66 000.

Рис. 24. Солнечно-водородный дом в Малайзии

Первичным источником энергии является фотоэлектрическая батарея, расположенная на крыше дома и состоящая из 42 кремниевых поликристаллических модулей суммарной пиковой мощностью около 5 кВт. Производство водорода и кислорода осуществляется в твердополимерном электролизере (рис.25) производительностью до 1 нм3 в час по водороду. Изготовитель и поставщик электролизера – компания PROTON Energy Systems (США).

Рис.25. Электролизер HOGEN RE Series

Произведенный в электролизере кислород выбрасывается в окружающую среду, а водород при давлении 13,8 бар, соответствующем давлению в электролизере, аккумулируется в ресивере объемом 1500 литров, расположенном вне дома.

Накопленный в ресивере водород используется – на кухне для приготовления пищи, – для подогрева воды на санитарные нужды, – в водород-воздушном ТЭ, генерирующем электроэнергию для энергопитания электрооборудования дома. Для обеспечения гарантированности энергопитания потребителей установка имеет возможность подключения к централизованной сети.

Стоимость получаемой электроэнергии достигает 100-120 у.е./Вт*ч [31].

Несколько лучше в технико-экономическом плане выглядит водородный цикл с паровой турбиной – применение отработанных и высокоресурсных компонентов резко снижает затраты на обслуживание, а диапазон мощностей, в котором должны применяться данные системы, затрудняет использование других типов А (речь идет о системах 1-100 МВт). Применение подобных систем в комбинации с различными типами ВИЭ (приливными, ветровыми, солнечными электростанциями), а также для регулирования потоков энергии в крупных сетях описано в статье С.П.Малышенко и др. [27]. Там же описаны работы ОИВТ РАН и КБХА (г. Воронеж) по созданию высокотемпературных водород-кислородных ПГ. В России достаточно широкий круг организаций занимается работами по водородной тематике. ООО НИК НЭП совместно с ФТИ РАН проектировало солнечно-ветровую ЭУ с водородным циклом.

Работы над высокотемпературными ПГ ведутся ОИВТ РАН и ОАО КБХА, паротурбинные установки серийно выпускаются рядом предприятий.

2.6.2 Вторичные источники энергии.

Избыточная дешевая электроэнергия в ночное время может быть использована для электролитической диссоциации воды на кислород и водород. В дальнейшем полученный водород, соединяясь с подаваемым в систему углекислым газом, образует метан, который можно хранить и использовать для получения энергии в любое время. По оценкам ученых, эффективность подобного преобразования выше 60%. Способ позволяет интенсифицировать и удешевить процесс получения водорода, при этом обеспечить экологическую безопасность. Разработчики. Beacon Power, Magnum Energy HC.

2.7 Электрические накопители - конденсаторы

Самые массовые «электрические» накопители энергии — это обычные радиотехнические конденсаторы. Они обладают огромной скоростью накопления и отдачи энергии — как правило, от нескольких тысяч до многих миллиардов полных циклов в секунду, и способны так работать в широком диапазоне температур многие годы, а то и десятилетия. Объединяя несколько конденсаторов параллельно, легко можно увеличить их суммарную ёмкость до нужной величины.

Конденсаторы можно разделить на два больших класса — неполярные (как правило, «сухие», т.е. не содержащие жидкого электролита) и полярные (обычно электролитические). Использование жидкого электролита обеспечивает существенно бóльшую удельную ёмкость, но почти всегда требует соблюдения полярности при подключении. Кроме того, электролитические конденсаторы часто более чувствительные к внешним условиям, прежде всего к температуре и имеют меньший срок службы (с течением времени электролит улетучивается и высыхает).

Недостатки: малая удельная плотность запасаемой энергии и потому небольшая ёмкость; малое время хранения, которое обычно исчисляется минутами и секундами и редко превышает несколько часов.

Область применения конденсаторов ограничивается различными электронными схемами и кратковременным накоплением, достаточным для выпрямления, коррекции и фильтрации тока в силовой электротехнике — на большее их пока не хватает.

2.7.1 Емкостные накопители энергии

Емкостные накопители энергии (ЕНЭ) относятся к разряду наиболее мощных энергоисточников. Они надежны в работе, обладают высокой эффективностью передачи накопленной энергии в нагрузку, допускают возможность изменения в широких пределах параметров импульса. Для зарядки ЕНЭ могут быть использованы маломощные зарядные устройства.

Вследствие малой удельной энергоемкости (наиболее распространенные конденсаторы имеют удельные параметры всего примерно 0,1 Дж/г, примерно 0,3 Дж/см3) создание ЕНЭ с запасаемой энергией более 10 МДж затруднительно. Увеличение удельной энергоемкости возможно за счет применения более совершенных компонентов при изготовлении конденсаторов, совершенствования технологии их сборки, уменьшения ресурса (числа пусков), работы конденсаторов в апериодическом режиме разряда.

О достижениях в области конденсаторостроения можно судить по рекламным проспектам мирового лидера - фирмы "Maxwell Laboratories, Inc". Фирма рекламирует два типа бесфольговых коммерческих конденсаторов - СМ и СН. Плотность энергии в указанных типах конденсаторов обеспечена благодаря применению перспективных металлизированных диэлектриков. Известно, что в Японии при аналогичных разработках используется пластмассовый диэлектрик на основе фтористых соединений поливинилидена. Особенностью данных типов конденсаторов является малоиндуктивная изолирующая вставка в металлическом корпусе конденсатора, обеспечивающая низкий внутренний импеданс. Отличие конденсаторов серии СМ от широко распространенных фольговых с бумажно-масляной изоляцией (0,1 Дж/г) заключается в лучших массогабаритных характеристиках (1,5 Дж/г), большей долговечности и надежности, а также медленной деградации эксплуатационных характеристик после гарантированного срока наработки на отказ, что позволяет исключить незапланированные аварии. Конденсаторы этой серии отличаются низкой стоимостью. Гарантируется безотказная работа в течение гарантированного срока эксплуатации.

Номинальное напряжение конденсаторов серии СМ - 25 кВ; максимальная энергоемкость стандартной банки - 50 кДж (имеются возможности повышения энергоемкости), время разряда — более 0,5 мс, амплитудные значения пиковых токов — до 50 кА. Основные параметры и особенности работы конденсаторов этой серии приведены в таблице 4.

2.7.2 Основные параметры работы импульсных конденсаторов серии СМ и СН

В отличие от конденсаторов серии СМ конденсаторы класса СН имеют большие пиковые значения амплитуд токов и более глубокую степень разрядки конденсатора; их конструктивное исполнение является более надежным при работе в неблагоприятных по влажности и пыли условиях. Эта серия имеет существенно более высокие характеристики по частоте следования циклов заряд-разряд. Номинальное напряжение зарядки

конденсаторов серии СН - 50 кВ; время разрядки - более 100 мкс, амплитудные значения пиковых токов достигают 100 кА.

Таблица 4

Марка	Плотность энергии, Дж/г (Дж/см3)	Частотность, имп/мин	Особенности конструкции и эксплуатации; назначение
СМ-1	<0,7 (1,0)	<0,5	Количество циклов заряд-разряд: > 30000 (для малоэнергетических банок); > 1200 - для 50 кДж банок
СМ-2	<0,8 (0,9)	<0,5	Предназначен для продолжительной работы в частотном режиме
СМ-3	<1,5 (2,5)	<0,5	Наивысшая коммерчески доступная плотность энергии. Благодаря поляризованности диэлектрика допускает переполюсовку тока
СН-1	<0,4 (0,8)	10	20 кДж банки имеют максимальную продолжительность наработки на отказ
СН-2	<0,4 (0,5)	100	Предназначен для продолжительной работы в частотном режиме
СН-3	<0,8 (1,5)	0,005	Ограниченная длительность частотного режима работы

Вышеизложенное относится к серийно выпускаемым конденсаторам универсального назначения. Специальные разработки фирмы "Maxwell" имеют существенно большие удельные характеристики. Например, в 1990 г. фирма создала конденсаторы с плотностью энергии ~2,8 Дж/г и 5,6 Дж/см3. При этом показательна динамика роста удельных характеристик конденсаторов этой фирмы: 1974 г. - 0,05 Дж/г и 0,08 Дж/см3; 1988 г. - 0,6 Дж/см3, через два года плотность энергии выросла еще на порядок. Ставится задача создания конденсаторов с плотностью энергии 25 Дж/г и 50 Дж/см3. Удельные параметры полной системы ЕНЭ примерно втрое хуже, чем удельные параметры отдельных конденсаторов. Например, мобильный модуль фирмы FMC с энергозапасом ~11 МДж (22 банки энергоемкостью 550 кДж каждая), смонтированный на шасси грузового трейлера в 1988 г., имел объемную плотность энергии около 0,25 Дж/см3. Разработчики импульсных конденсаторных батарей предполагают уменьшить массогабаритные показатели за счет создания интегрированных систем и

использования компактных источников запитки. ЕНЭ пригодны для работы в режиме генерирования периодических импульсов, однако при повышении частоты следования импульсов параметры ухудшаются вследствие снижения допустимых удельных параметров конденсаторов и наличия в составе системы все более мощного источника зарядки ЕНЭ.

2.7.3 Молекулярные накопители энергии

Молекулярные накопители энергии - МНЭ представляют собой конденсаторы с двойным электрическим слоем. Они отличаются от обычных импульсных конденсаторов тем, что для пространственного разделения разноименных зарядов, создающих рабочее электрическое поле, используются не макроскопический диэлектрический слой между проводящими обкладками, а микроскопический поляризованный слой на границе поверхности раздела двух сред. Исследованиями установлено, что максимальная плотность энергии в пределах 10^2-10^3 Дж/см3 при минимальной утечке тока от 10-3 до 10-5 А/Ф может быть достигнута, если осуществляется контакт полупроводника или металла с диэлектрической (электронно-изолирующей) молекулярной жидкостью, содержащей парные подвижные ионы.

К настоящему времени исследованы системы МНЭ с удельной энергией до 10-25 Дж/г и 40-50 Дж/см3, что примерно в 100 раз превышает удельную энергию известных конденсаторов. В технологически освоенных образцах накопителей энергии, испытанных в различных режимах разряда с длительностью импульса до 0,1-100 с, достигнуты значения удельной энергии 1-10 Дж/г и 2-15 Дж/см3. Удельная средняя мощность МНЭ составляет в зависимости от длительности разряда величину 0,1-10 кВт/кг, что существенно превышает удельную мощность традиционных накопителей энергии (в том числе и аккумуляторов). Количество допустимых циклов "разряд-заряд" для МНЭ различных типов составляет от 10^4 до 10^5. Однако возможность использования данных накопителей значительно ограничена тем, что для них минимальная длительность разряда характеризуется миллисекундными временами, а генерируемые токи - единицами килоампер.

2.7.4 НЭ - суперконденсатор

Суперконденсатор - СК представляет собой импульсное электрохимическое устройство, предназначенное для компенсации быстрых переходных процессов в различных электрических схемах. От А различных типов он отличается существенно меньшей энергоемкостью (единицы Вт*ч/кг) и повышенной удельной мощностью (2-10 кВт/кг). Отсутствие фарадеевских процессов при работе СК приводит к увеличению его ресурса по сравнению с А, а также к отсутствию ограничений по глубине его разряда.

Двойнослойный суперконденсатор - ДСК состоит из двух пористых электронпроводящих электродов, разделенных заполненным электролитом

сепаратором (рис. 26). Процесс запасания энергии в ДСК осуществляется за счет разделения заряда на двух электродах с достаточно большой разностью потенциалов между ними. Разность потенциалов обычно определяется величиной напряжения разложения электролита. Эта величина лежит в районе 1,23 В для водных электролитов (щелочей и кислот) и в районе 2,5-4 В для органических электролитов. Процессы, происходящие в двойном электрическом слое (ДЭС) на границе раздела двух проводников, сродни тем, которые протекают в обычном конденсаторе, однако в этом случае расстояние между несущими различный заряд обкладками составляет несколько межатомных длин, так как фактически одна обкладка представлена электронами в электронном проводнике, сгруппированным и в приповерхностном слое, а вторая – сорбированными на поверхности катода положительными ионами электролита (катионами) [42]. На аноде слой формируется за счет обеднения электронами электронного проводника и сорбции отрицательных ионов электролита. Таким образом, для достижения максимальной емкости необходимо обеспечить как можно большую поверхность контакта электролита с электронным проводником. Поэтому в качестве электронного проводника обычно используются нанопористые углеродные материалы. Жидкий электролит обычно заключен в пористый полимерный или асбестовый сепаратор, разделяющий электроды во избежание короткого замыкания. Для повышения запасенной СК энергии используются органические электролиты с высоким напряжением разложения [43].

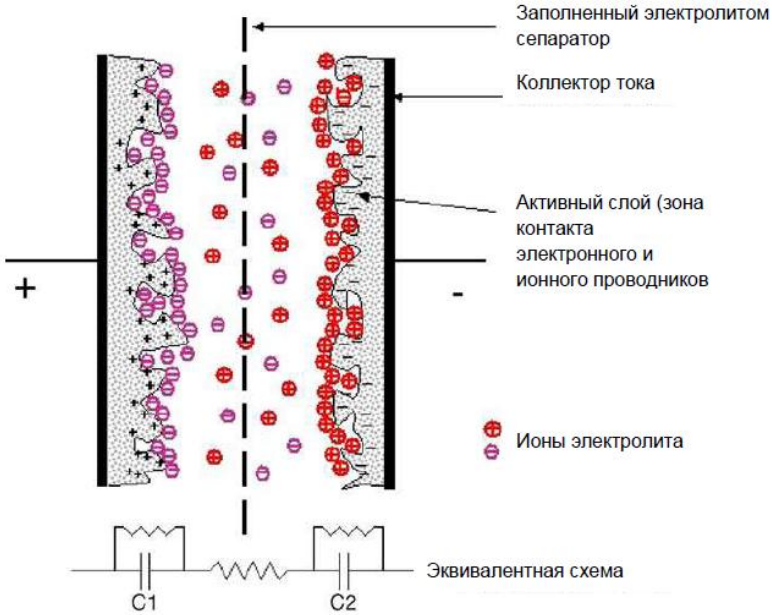


Рис. 26. Схема единичной ячейки ДСК.

В таблице 5 приведены характеристики СК США, Японии, Кореи, Франции, Германии, Австралии [44].

Таблица 5. Характеристики суперконденсаторов

Device	V rated	C (F)	R (mOhm)	RC (sec)	Wh/kg	W/kg (95%)	Wgt. (kg)	Vol. lit.
Maxwell	2.7	2885	.375	1.08	4.2	994	.55	.414
Maxwell	2.7	605	.90	.55	2.35	1139	.20	.211
ApowerCap	2.7	55	4	.22	5.5	5695	.009	---
Apowercap	2.7	450	1.4	.58	5.89	2574	.057	.045
Ness	2.7	1800	.55	1.00	3.6	975	.38	.277
Ness	2.7	3640	.30	1.10	4.2	928	.65	.514
Ness (cyl.)	2.7	3160	.4	1.26	4.4	982	.522	.38
Asahi Glass (Пропилен карбонат)	2.7	1375	2.5	3.4	4.9	390	.210	.151
Panasonic (Пропилен карбонат)	2.5	1200	1.0	1.2	2.3	514	.34	.245
EPCOS	2.7	3400	.45	1.5	4.3	760	.60	.48
LS Cable	2.8	3200	.25	.80	3.7	1400	.63	.47
BatScap	2.7	2680	.20	.54	4.2	2050	.50	.572
Power Sys. (Актив. уголь, пропилен карбонат)	2.7	1350	1.5	2.0	4.9	650	.21	.151
Power Sys. (Графит. уголь пропилен карбонат)	3.3 3.3	1800 1500	3.0 1.7	5.4 2.5	8.0 6.0	486 776	.21 .23	.15 .15
Fuji Heavy Industry-hybrid (AC/графит. уголь)	3.8	1800	1.5	2.6	9.2	1025	.232	.143
JSR Micro (AC/графит. уголь)	3.8	1000 2000	4 1.9	4 3.8	11.2 12.1	900 1038	.113 .206	.073 .132

Учитывая особенности СК, целесообразно их использование в гибридных схемах с А. В этом случае СК реагирует на короткие пики генерации или потребления электроэнергии, увеличивая ресурс А и снижая время отклика всей схемы на внешние воздействия. Такие схемы могут применяться для повышения качества электроэнергии, вырабатываемой традиционными ЭУ и ЭУ на основе ВИЭ (сглаживание флуктуаций напряжения), в электротранспортных средствах и гибридных автомобилях (рекуперация энергии торможения и разгон транспортного средства), для обеспечения работы рентгеновских установок и быстрого запуска ДГУ, особенно в условиях пониженных температур [42]. В энергоустановках с ВИЭ просматривается ниша применения таких систем в гибридных ветродизельных установках для сглаживания быстрых колебаний мощности с характерным временем менее секунды, порождаемых флуктуациями, возникающими как при работе дизеля, так и ветроустановки. Также существенной экономии можно достичь, применяя СК в системах с ярко выраженной импульсной нагрузкой – фотоэлектрические водоподъемные системы, где кратковременный бросок мощности нужен для запуска двигателя насоса, или источники автономного питания импульсных передатчиков, описанные в [45].

Таблица 6 Спецификация суперконденсаторов

Тип СК, кДж/В	**U, В**	**С, Ф**	**I max разряда, А**	**Длина, мм Ø=230**	**Масса, кг**	**Применение**
914	14	100	670	120	12,5	Пуск ДВС легковых и грузовых автомобилей, тракторов, комбайнов; сельскохозяйственной, коммунальной, дорожно-строительной и прочей автотракторной техники; дрезин; дизелей путевых машин, ремонтно-восстановительных поездов, рефрижераторных вагонов
12/14	14	140	1350	160	17,5	
25/14	14	255	2000	275	27,0	
4028	28	100	2400	310	30,0	
60/28	28	180	2400	500	40,0	
60/28А	28	320	3000	500	40,0	
70/36	36	110	1800	510	40,0	Гибридный транспорт, электромобиль, электрокар, источники бесперебойного питания
90/300	300	2,0	500	570	38,0	
40/96	96	8,5	1300	390	34,0	Конденсаторная система пуска дизелей магистральных и маневровых тепловозов
40/64	64	23,0	2125	415	38,0	
1,5/18	15	7,0	500	120	10,0	Агрегаты бесперебойного питания, электропривод коммутационных аппаратов, акустические системы, навигационные маяки, импульсные источники тока
33/200	200	1,65	330	290	30,0	
20/150	150	1,8	375	265	23,0	
15/175	175	1,0	350	235	21,5	
40/300	300	0,9	400	490	40,0	
160/800	800	0,5	1000	720	50,0	
37/2700	2700	0,01	2000	600	45,0	

Применение СК наиболее эффективно в таких областях, где требуется импульсное выделение энергии за время порядка 0,1 ÷ 10 с, например:

обеспечение гарантированного пуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС) легковых и грузовых автомобилей, локомотивов, спецтехники при неблагоприятных эксплуатационных условиях (экстремальные температуры окружающей среды, разряженная аккумуляторная батарея); системы бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей: системы управления, жизнеобеспечения, связи, опасные производства и др.; импульсное технологическое оборудование, рентгеновские аппараты и другие приборы медицинского назначения; в комбинации с ветро- и гидрогенераторами, солнечными батареями; источники импульсной мощности для разгона электромобилей и рекуперации энергии при торможении; взамен аккумуляторов в малогабаритных электротранспортных средствах с заданным маршрутом.

Преимущества СК: пожаро- и взрывобезопасны; обладают высокую механическая прочность; устойчивы к кратковременным воздействиям высоких перенапряжений и токам короткого замыкания; отсутствие обслуживания в процессе эксплуатации, высокая надежность, большой срок службы; диапазон рабочих температур -45°С …+50°С; не содержит токсических веществ; конструкция достаточно проста, используемые материалы не дорогие; применяемые технологические процессы высокопроизводительны. Это позволяет серийно производить новые СК по относительно низкой цене.

Устройство и принцип действия СК. СК представляет собой молекулярный накопитель энергии (накопитель энергии), накопление заряда в котором осуществляется в двойном электрическом слое в объеме сверхпористого углерода. Металлический корпус СК состоит из обечайки и крышек, сваренных друг с другом аргонодуговой сваркой. Токовыводы располагаются на торцевых сторонах цилиндра (по центру крышек). Внутри корпуса находятся блоки накопительных элементов, представляющих собой многослойную тонкопленочную конструкцию, состоящую из пористых углеродных электродов, сепаратора и токосъемных пластин. Полости (свободные объемы) между корпусом и блоками накопительных элементов заполнены эпоксидным компаундом.

2.8 Индуктивные накопители

Индуктивные накопители энергии - ИНЭ характеризуются высокими выходными параметрами электрического импульса (более 10^5 В, 10^{11} Вт), а также высокими удельными и экономическими показателями. Освоен уровень накапливаемых энергий порядка 10^8 Дж. Ближайшей перспективой является практическая реализация параметров порядка 10^9 Дж и 10^{12} Вт. Широкое практическое использование ИНЭ ограничивается надежностью

коммутирующей аппаратуры многоразового действия с уровнем разрывной мощности до 10^{12} Вт.

Для накачки энергии в ИНЭ используются источники тока с большой электрической мощностью, чтобы уменьшить время зарядки до единиц секунд. В противном случае джоулевы потери энергии при запитке ИНЭ могут оказаться сравнимыми с запасаемой в накопителе энергией. Для запитки ИНЭ могут быть использованы электромашинные накопители (ударные униполярные и синхронные генераторы), МГД-генераторы кратковременного действия (МГДКД, ЖМГДГ), химические источники тока. Уровень мощности источников накачки должен быть согласован со временем сохранения энергии в накопителе. По времени сохранения различают резистивные (1-10 с), криорезистивные с охлаждением до температур жидкого азота (10-100 с) и сверхпроводящие накопители с охлаждением до температур жидкого гелия. При температуре жидкого азота (77 К) активное сопротивление электротехнического алюминия уменьшается примерно в пять раз, что снижает требуемую мощность источника запитки ИНЭ такого типа. При температуре жидкого неона (20 К) сверхчистый алюминий (0,9999) теряет сопротивление на три порядка, что приблизило бы его по параметрам запитки к сверхпроводящим ИНЭ. Однако в режимах генерации серий импульсов эти системы с криоохлаждением теряют свои преимущества из-за медленного (минуты) возврата температуры проводника к исходному состоянию после нагрева предыдущим импульсом. Самый крупный индуктивный накопитель ТИН-900 создан в России для токомака. Запас энергии - 900 МДж с током 1,8 мегаА при времени разряда 0,5 с.

2.8.1 Индуктивные накопители. Сверхпроводящий индуктивный накопитель

Сверхпроводящий индуктивный накопитель СПИН – устройство, запасающее энергию в магнитном поле индукционной катушки, в которой ток циркулирует без потерь. В конструкции СПИН можно условно выделить три основных конструктивных узла: собственно магнитная система, криогенная система и система связи с внешней сетью, т.н. преобразователь-инвертор. Метод накопления электроэнергии с помощью СПИН отличается экологической чистотой. Не используются вредные материалы, никаких химических реакций не происходит. Отходы производства отсутствуют. Важнейшим преимуществом индуктивного накопителя является его быстродействие, достигающее единиц миллисекунд, что позволяет реагировать на самые внезапные аварии в энергосистеме.

Сверхпроводящие индуктивные накопители энергии - СПИН имеют широкие перспективы использования, обусловленные возможностью длительного хранения энергии в форме магнитной энергии, что позволяет создавать системы с высоким уровнем времени готовности. Время от подачи команды до выдачи энергии в нагрузку порядка 0,001 с. Важной в

практическом отношении особенностью СПИН является возможность его запитки от источника с малой электрической мощностью.

Применение СПИН в качестве импульсных энергоисточников ограничивается критичностью сверхпроводников к скорости изменения магнитного поля при накачке и выводе энергии в нагрузку. Особенностью типичных СПИН является сравнительно малое значение рабочего тока – порядка 10 кА. Методы электромашинного и электромеханического управления индуктивностью ИНЭ позволяют увеличить значения полного тока в нагрузке, однако другое ограничение - скорость изменения поля не превышает 20 Тл/с увеличивает время разрядки до десятков миллисекунд.

Новые технические возможности в создании СПИН могут быть связаны с разработкой высокотемпературных сверхпроводников. Высокотемпературные сверхпроводящие материалы характеризуются сравнительно высокими значениями критических полей – около 100 Тл и все еще высокими температурами сверхпроводящих состояний.

Основное развитие импульсных источников данного класса предполагается в направлении роста запасаемой электрической энергии без заметного увеличения выходной мощности. Для импульсных накопителей энергии характерен широкий диапазон изменения выходных токов и напряжений электрических импульсов: токи в интервале 10^3—10^7 А, напряжения в интервале десятки вольт — единицы мегавольт, и соответственно, мощности до 10^{12} Вт, энергии до 10^9 Дж. Удельные энергетические характеристики достаточно высоки и могут достигать значений 10^2 Дж/г. Наибольший прогресс можно ожидать в области развития емкостных и индуктивных накопителей энергии, но с учетом эксплуатационных преимуществ ЕНЭ можно предположить сохранение их доминирующего положения при использовании для самого широкого круга применений.

2.9 Импульсные МГД -генераторы

2.9.1 Жидкометаллические МГД-генераторы

Жидкометаллические МГД-генераторы (ЖМГДГ) - неразрушаемая в каждом пуске электрическая машина замкнутого цикла (по жидкометаллическому рабочему телу), работающая в частотном режиме до 1 Гц при замене порохового заряда. Характерная длительность импульса тока от 10-3 до 10-1 с. Характерной особенностью ЖМГДГ являются низкие генерированные напряжения 0,1-1 кВ.

2.9.2 МГД-генераторы кратковременного действия

МГД-генераторы кратковременного действия (МГДКД) - имеют высокие удельные параметры (удельная мощность свыше 0,5 МВт на тонну конструкции, расход топлива 25-70 кг/с, удельный энергосъем 0,7 МДж на

килограмм топлива). Характерное время генерации электрического импульса в таких установках 2-10 с; низкие, порядка единиц киловольт, генерируемые напряжения.

Серия установок на базе МГДКД мощностью от 10 до 600 МВт.

Энергетические характеристики импульсных МГД-генераторов приведены на рисунке 27:

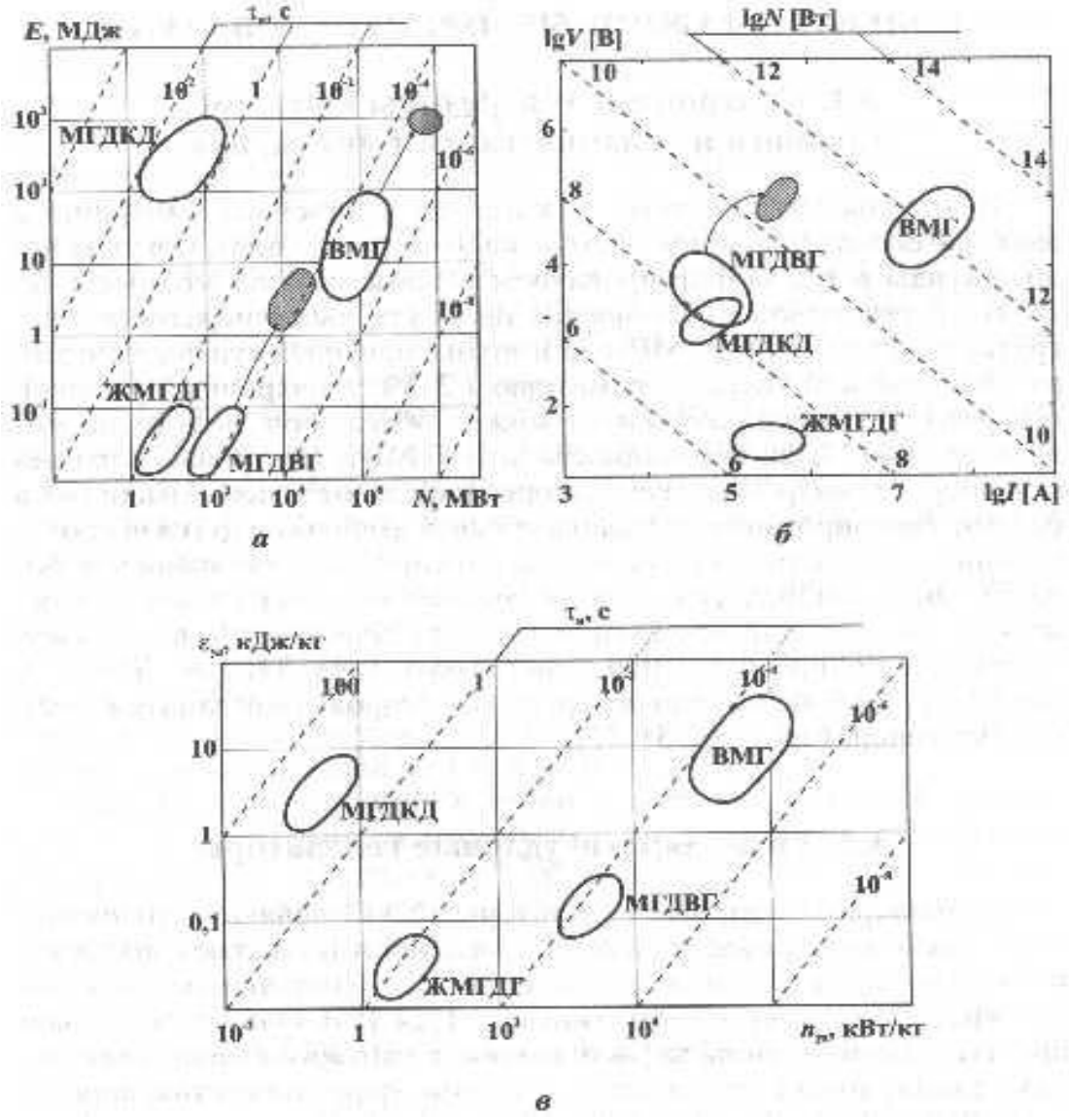


Рис 27 - Энергетические характеристики импульсных МГД-генераторов а - энергомощностные, б - электрические, в - удельные энергетические

2.10 Электромашинные преобразователи

2.10.1 Синхронные генераторы в режиме ударного и динамического торможения

В импульсном (ударном) режиме промышленные синхронные электрогенераторы, применяемые на электростанциях, могут за доли секунды в таком форсированном режиме развить мощность до 10^9 Вт. В действующих установках таких ударных генераторов в нагрузку передается до 10 МДж за

импульс при эффективности отбора кинетической энергии от маховика 2-3%. Синхронный ударный генератор за несколько секунд может обеспечить получение импульсов 1000 МДж при мощности до 100 МВт. По уровню запасаемой энергии синхронные генераторы допускают использование их в режиме генерирования последовательных импульсов (раз в несколько минут, необходимых для восстановления частоты вращения ротора). Эксплуатация синхронных генераторов сдерживается в основном из-за низкой эффективности передачи энергии в нагрузку. Выпускаемые промышленно генераторы типа ТИ-100, ТИ-75-2, ТИ-12-2 применяются, например, для форсированной запитки плазменных генераторов.

2.10.2 Униполярные ударные генераторы

Униполярные ударные генераторы (УУГ) являются специальным типом электромашинных накопителей и позволяют получать импульсы с предельной мощностью 10^{11} Вт. Действующие в настоящее время УУГ имеют энергетику до 1 ГДж. Они относительно просты в изготовлении, характеризуются высокими удельными показателями, низкой стоимостью, высокой эффективностью передачи энергии в нагрузку (до 80%). По своим выходным параметрам УУГ эффективны как средство запитки индуктивных накопителей. Использование катушки ИНЭ в качестве обмотки возбуждения УУГ позволяет создавать компактные высокомощные источники импульсной энергии. УУГ являются низковольтными источниками (~100 В), что обусловливает ряд проблем при сильноточном (~10^7 А) токосъеме, так как контактные падения напряжения имеют сравнимую величину (~40 В).

2.10.3 Компрессионные генераторы

Одним из перспективных путей создания источников питания, работающих в частотном режиме, является использование электромашинных устройств, называемых компрессионными генераторами (компульсаторами). В настоящее время созданы устройства с энергией 10 Дж в импульсе длительностью 0,2-1 мс при частоте следования до 200 Гц. По своим удельным параметрам КГ могут успешно конкурировать с системами частотного действия, построенными на основе других принципов. Считается возможным создание компрессионных генераторов с энергией в импульсе ~10^6 Дж и реализация частоты повторения импульсов до 500 Гц. На 6-м симпозиуме по технологии электромагнитного разгона (апрель 1992 г., Остин, Техас, США) было заявлено о создании компульсатора с "воздушным" сердечником на основе композиционных материалов с удельной энергией уровня 3 кДж/кг, что сравнимо с параметрами УУГ. Стремительное развитие компульсаторов от лабораторных устройств с энергией 100 кДж до крупных устройств мегаджоульного диапазона подтверждает перспективность этой электрической импульсной машины.

Энергетические характеристики электромашинных преобразователей представлены на рисунке 28:

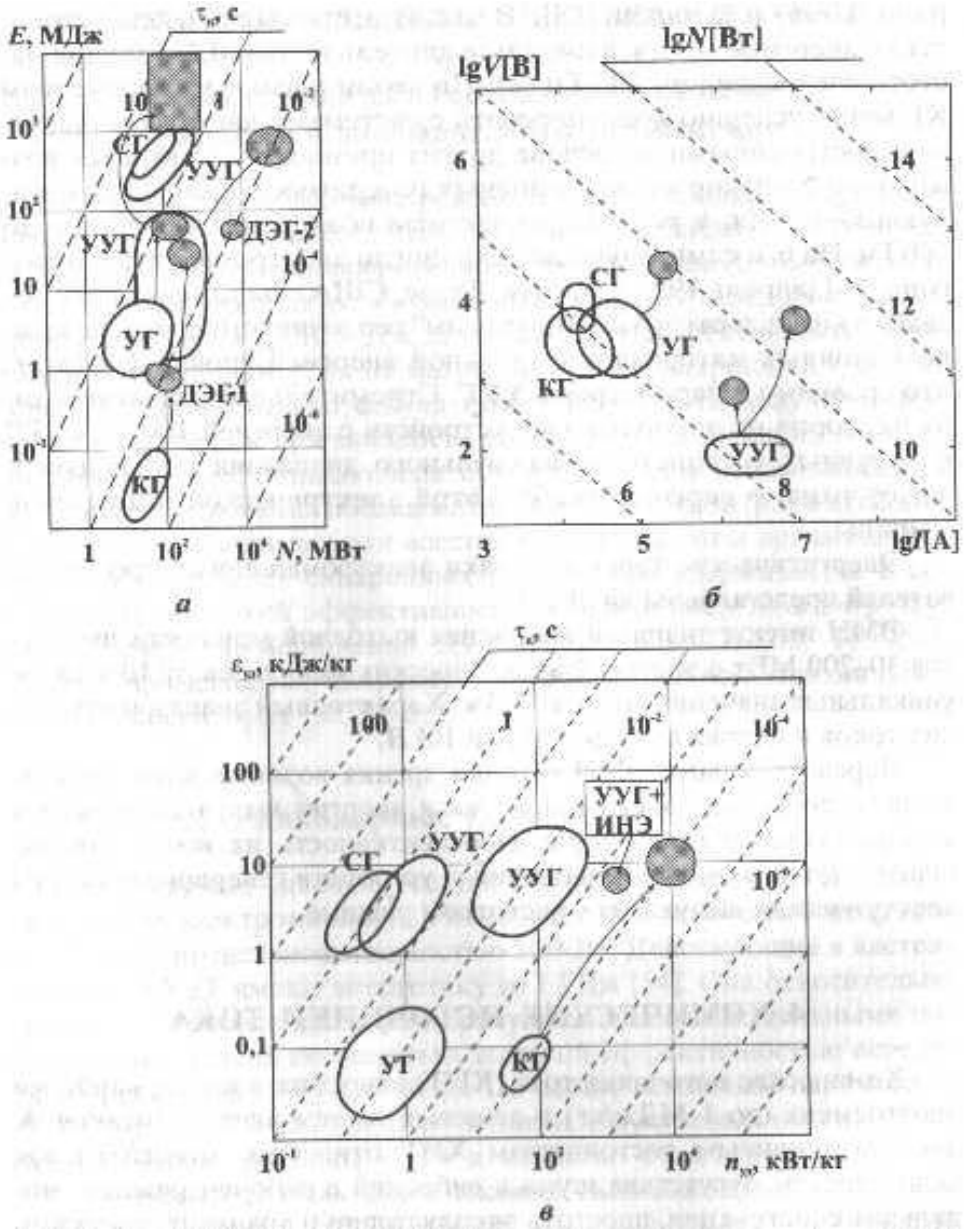


Рис. 28 Энергетические характеристики электромашинных преобразователей а - энергомощностные, б - электрические, в - удельные энергетические; СГ и УГ - синхронные генераторы в режиме динамического торможения и ударном режиме соответственно, ДЭГ-1, ДЭГ-2 - проекты дисковых электрогенераторов 1992 и 2000 гг.

ЭМН имеют диапазон изменения выходной мощности импульсов 30-200 МВт с энергией электрических импульсов от 10 кДж до уникальных значений уровня 1 ГДж. Диапазон токов и напряжений до 10^5 А и 10^5 В.

Перспективными ЭМН с точки зрения возможностей существенного роста плотности мощности и энергии импульса являются компрессионные генераторы. Перспективность их использования определяется возможностью данных устройств генерировать серии электрических импульсов в частотном режиме.

2.10.4 Электромагнитные накопители электрической энергии

К электромагнитным накопителям электроэнергии относятся два вида комплексов: синхронные машины с преобразователями частоты в первичной цепи с маховиками на валу и асинхронизированные машины с маховиками на валу. В настоящее время нет практических ограничений по созданию агрегатов на основе синхронных машин мощностью до 300-400 МВт и на основе асинхронизированных машин мощностью до 800-1600 МВт.

Агрегаты на основе мощность преобразовательных имеют больший диапазон изменения скорости и большую способность использования кинетической энергии вращающихся машин, а на основе асинхронизированных машин способны работать в диапазоне регулирования скорости 50% от синхронной, имеют меньшую мощность преобразовательных устройств.

В первом случае мощность преобразователя равна мощности синхронной машины, а во втором – пропорциональна глубине регулирования.

2.11 **Накопители электроэнергии большой мощности для технологии Smart Grid**

Одним из важнейших элементов технологии Smart Grid являются современные накопители электроэнергии большой мощности. Долгое время ограничением к применению НЭ на подстанциях систем электроснабжения были их габаритные размеры и недостаточная мощность. Однако в последние годы в связи с совершенствованием и развитием технологий эти ограничения сняты. Во многих городах мира уже проходят испытания и успешно внедряются системы НЭ для городского электротранспорта. Лидирующие позиции во внедрении этих энергосберегающих технологий занимает Япония. Используемые японскими инженерами в данных системах блоки А значительно превосходят по удельной плотности энергии по объему и массе, а также другим ключевым показателям НЭ электроэнергии других производителей.

Системы НЭ могут быть как бортового, так и стационарного исполнения. С учетом анализа технико-экономической эффективности для обоих вариантов установки НЭ, для метро предпочтителен вариант установки стационарных НЭ-систем на подстанциях. В первую очередь это связано с незначительной разницей в цене систем НЭ для подстанций и бортовых систем НЭ для подвижного состава при значительной разнице в количестве подстанций и используемых мотор-вагонов. Таким образом, получение практически аналогичного экономического эффекта связано с большими капитальными вложениями и техническими трудностями по оборудованию всего парка подвижного состава НЭ-системами.

Стационарные системы НЭ могут устанавливаться на подстанциях и в серединах фидерных зон. Установка в середине фидерных зон будет способствовать лучшей стабилизации напряжения в сети по сравнению с вариантом установки на подстанциях, однако в условиях метро стационарные системы НЭ рационально размещать именно на подстанциях, поскольку разгон и торможение поездов осуществляются преимущественно возле подстанций. Кроме того, на подстанциях лучше технические условия для размещения данного оборудования.

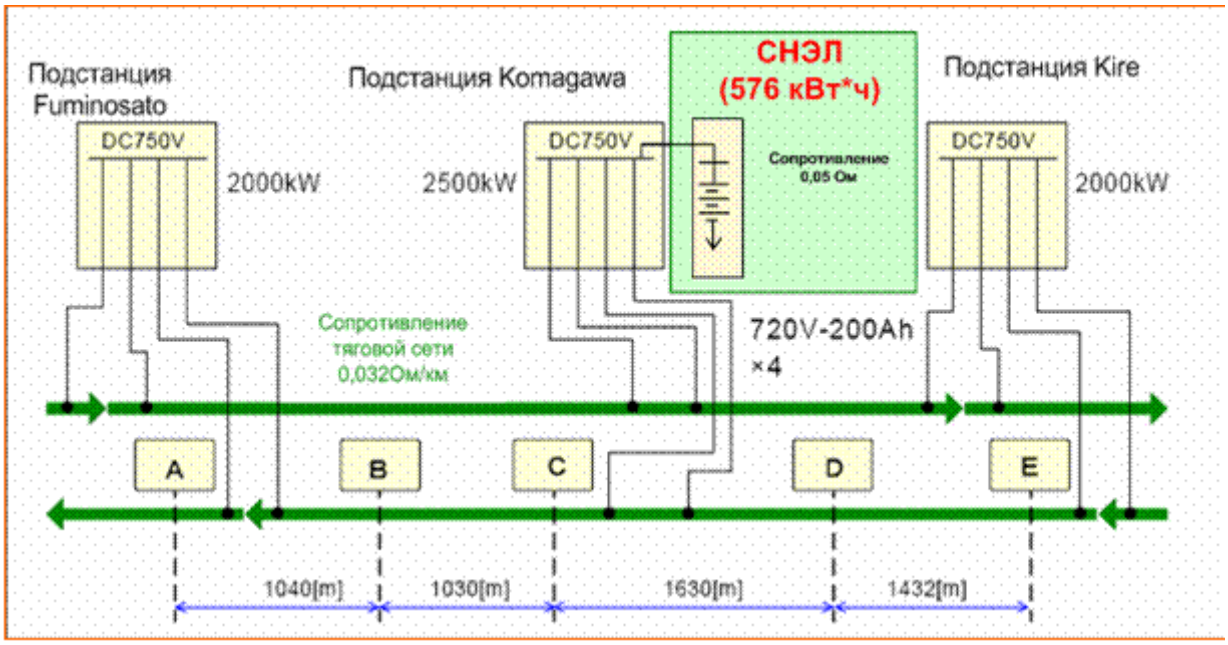


Рис. 29 Схема подключения СНЭП к шинам подстанции

Системы НЭ электроэнергии уже прошли успешные испытания и в настоящее время установлены в системах электроснабжения метрополитенов г. Осака (Япония) и Нью-Йорка (США). На рисунке приведена схема подключения системы НЭ к шинам подстанции Komagawa линии Tanimachi муниципального метро г.Осака при проведении испытаний.

Основные преимущества НЭ для систем электрифицированного городского транспорта: позволяет экономить порядка 25-40% от потребления электроэнергии на тягу поездов (экономия электроэнергии на подстанциях метро г.Осака за счет увеличения возможностей по использованию энергии рекуперации составляет 20-30% от общего электропотребления подстанциями); в часы пик, когда напряжение падает, разряд батарей позволяет соблюдать баланс между напряжением на НЭ и напряжением подстанции (на подстанциях метро г.Осака было достигнуто снижение установленной мощности каждой подстанции на 180-300кВт при использовании накопителей 225-600кВт·ч и установленной мощности подстанций 2000-2500кВт); применение НЭ позволяет вторично

использовать энергию рекуперации, что приводит к значительному снижению тепловых выбросов в туннель, и соответственно снижению расходов на вентиляцию и кондиционирование, улучшению климата на станциях, в туннелях и вагонах метро; при строительстве новых линий метрополитена следует учитывать, что стационарные НЭ-системы могут использоваться вместо подстанций, что значительно сокращает капитальные затраты на строительство и площадь, необходимую для размещения распределительного устройства; предотвращение провалов напряжения в линии в часы пик за счет разряда накопителя: в метро г.Осака за счет установки стационарных накопительных систем BPS минимальный уровень напряжения в линии был не ниже 700В при номинальном напряжении линии 750В, до установки систем BPS напряжение в линии падало ниже 600В. Важным преимуществом НЭ-систем является также то, что оборудование взрыво- и пожаробезопасно и выделяет никаких ядовитых испарений и не содержит токсичных веществ.

Благодаря использованию АКБ специальной конструкции, система подключается непосредственно к линии без использования каких-либо преобразователей.

Такое подключение имеет несколько существенных преимуществ: значительное снижение стоимости установки, простота монтажа и подключения к линии, отсутствие задержек во времени для приема и выдачи энергии рекуперации, а также отсутствие электромагнитных шумов при работе установки оказывающих негативное влияние на системы связи и сигнализации метрополитена. Помимо этого, данные системы очень компактны и могут быть установлены даже на пассажирской платформе.

Основным элементом системы стационарных накопителей являются герметичные никель-гидридные аккумуляторы GIGACELL высокой емкости - это следующее поколение накопителей, специальная конструкция которых позволяет обеспечить быстрый заряд и разряд. Для установки на тяговых подстанциях метрополитенов для приема энергии рекуперации и сокращения пиковой мощности подстанций используются специальная модификация модулей А, способных быстро запасать и отдавать большие объемы энергии. GIGACELL обладает специальной системой охлаждения с принудительными воздухозаборниками, поэтому ее температура не меняется даже в условиях быстрого заряда/разряда большими токами. Батарею А также легко утилизировать и разбирать, поскольку в ней не используются сварка.

2.12 Гибридный накопитель электрической энергии

С появлением ЛИА, имеющих малые габаритные размеры, небольшой вес, и длительный срок службы - количество циклов заряда/разряда превышает 5000, возникла возможность использования их в качестве емких и

малогабаритных НЭ в составе систем аварийного электроснабжения, и альтернативных источников энергии.

Гибридные НЭ включают в себя сам НЭ на ЛИА, а также другие модули и электронные блоки, применяемые в системах аварийного, бесперебойного или альтернативного энергоснабжения. По своей сути гибридный накопитель является законченным решением, готовым к применению оборудованием, к которому надо только подключить внешний источник энергии - линейную электросеть и/или солнечные батареи, а также нагрузку - домашнюю или офисную электросеть.

Типовой набор встроенных модулей гибридного НЭ следующий: ЛИА с системой управления; контроллер заряда от солнечных батарей; зарядное устройство от сети 220 В; инвертор на переменное напряжение 220 В и 50 Гц; схема контроля и управления. Возможно включение в состав гибридного НЭ модуля преобразования и передачи энергии, полученной от солнечной батареи в линейную электросеть по так называемому «зеленому тарифу».

Гибридный НЭ конструируется в виде единого устройства - блока или шкафа. Обычно применяется: в качестве НЭ, ИБП в составе системы аварийного энергоснабжения при недлительных перебоях в энергоснабжении; в составе системы аварийного энергоснабжения, работающей - при длительном отсутствии сетевого напряжения - от автономных источников энергоснабжения - бензо- дизель- газогенераторов; в составе альтернативной системы энергоснабжения - солнечной или ветряной (комбинированной), при отсутствии централизованного энергоснабжения; в комбинированной системе электроснабжения, запитанной от централизованной электросети, и использующей альтернативные источники энергии для аккумуляции электроэнергии, выдачи ее в нагрузку при перебоях в линейной электросети; а также для выдачи избытка электроэнергии, полученной от альтернативных источников в линейную сеть.

Преимущества использования гибридных НЭ на ЛИА: большая электрическая емкость АКБ при минимальных размерах; длительный срок службы ЛИА - на порядок больший, нежели у СКБ; высокая степень надежности в отличие от систем аварийного или альтернативного энергообеспечения, построенных из разрозненных узлов разных производителей; простота установки и настройки: достаточно подключить накопитель к линейной сети, к солнечным батареям, и домашней электросети; возможность использования в качестве ИБП; широкий диапазон входных напряжений при питании от солнечных батарей, и от линейной сети 220В; высокое качество выходного переменного синусоидального напряжения; наличие байпаса - автоматической передачи входного напряжения 220В в случае аварии накопителя; автоматическое отключение при перегрузке, перегреве, аварии; возможность работы в режиме генерации электроэнергии с продажей ее по «зеленому тарифу»; минимальные

эксплуатационные расходы, т.к. НЭ не требует никакого текущего обслуживания; малые габариты и малый вес.

Для оценки экономической эффективности сравним стоимость гибридного НЭ типа SESS-6912 с аналогичной по системой на обычных СКБ. Гибридный НЭ SESS-6912, мощность 5 кВт. Мощность установленных ЛИА - 6912 Вт. Имеет встроенный контроллер для подключения к солнечным батареям; блок зарядки от линейной сети напряжением 220В; встроенный инвертор с номинальной мощностью 5000 Вт, пиковой 7000Вт. Обеспечивает в нагрузке переменное напряжение 220 В с током 10 А в течение полутора часов. Схема подключения гибридного НЭ на рисунке 30.

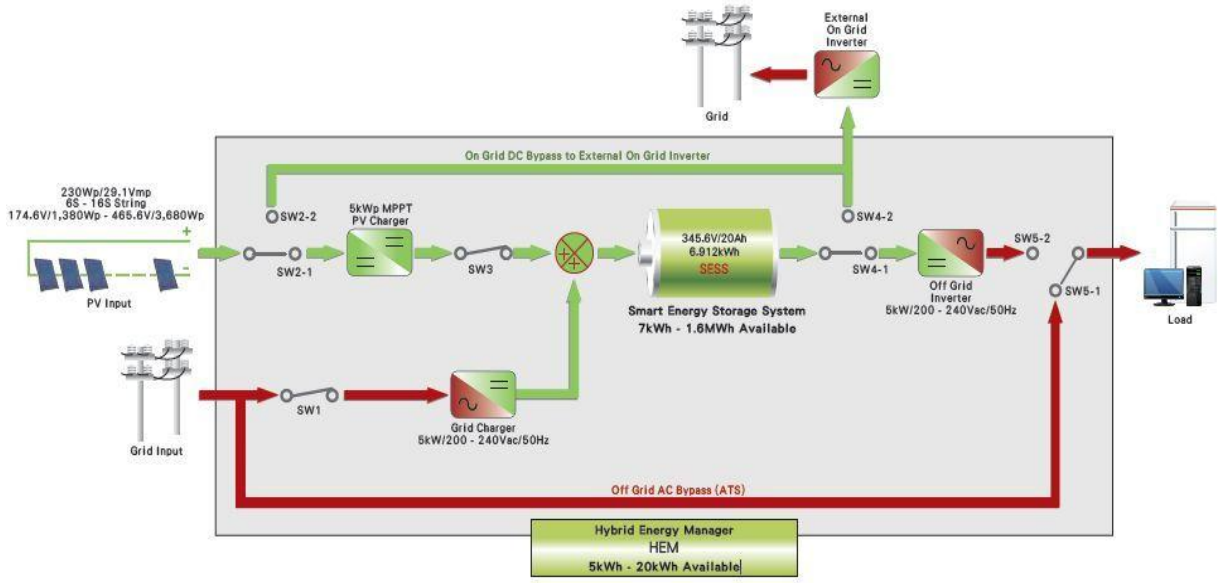


Рис. 30 Схема подключения гибридного накопителя энергии

В пересчете на условное напряжение 12 Вольт привычной нам СКА, получаем, что АКБ должна иметь емкость порядка 600 А*ч (6912/12), чтобы обладать мощностью НЭ на ЛИА. Таким образом, СКА той же емкости, что и емкость ЛИА, может состоять из трех параллельно включенных А емкостью по 200 А*ч, и ориентировочной ценой у.е.600/штука. Поэтому стоимость СКА той же емкости получится - 600х3=у.е.1800.

Однако, при активной эксплуатации ЛИА прослужат в 10 раз дольше: количество циклов заряда/разряда при разряде на 50% емкости у них - 5000, а у СКБ - только 500. Поэтому в течение 15 лет активной эксплуатации системы на СКБ, эти А придется, может быть, заменить 9 раз, то есть, эксплуатационные расходы составят еще минимум 1800х9=у.е.16200.

MPPT контроллер мощностью 5000Вт для солнечной системы на СКБ обойдется приблизительно в у.е.500. Инвертор на 5 кВт - у.е.1500. Зарядное устройство мощностью 5 кВт - у.е.500. Еще долларов 500 надо добавить на схему управления, монтажные материалы, провода, клеммы.

Общая стоимость аналогичной гибридному накопителю системы на СКБ составит: аккумуляторы - у.е.1800; инвертор - у.е.1500; MPPT

контроллер - у.е.500; зарядное устройство - у.е.500; схема управления, монтаж - у.е.500. Итого - у.е.4800

Стоимость гибридного накопителя на ЛИА - у.е.14000. Однако прослужит он в 10 раз дольше. За это время - весь срок эксплуатации - стоимость дополнительных эксплуатационных расходов в системе на СКБ составит минимум у.е.16200.

Совокупная стоимость приобретения и владения системой на СКБ за 15 лет эксплуатации выйдет минимум у.е.21000; а стоимость приобретения гибридным накопителем на ЛИА останется неизменной - у.е.14000, или - на у.е.7000 дешевле, чем у системы на СКБ. Заводской гибридный НЭ - это небольшой шкаф с оборудованием, размером 0,8х0,35х0,61 метра; вес - 105 кг. Варианты подключения гибридного НЭ на рисунке 31:

Рис. 31 Схема подключения

Выводы:

1) С учетом характерных графиков нагрузки и выработки энергии от возобновляемых источников энергии дана оценка возможностям наиболее

распространенных систем накопителей энергии: жидкостных аккумулирующих систем; пневмоаккумулирующих систем - накопителей электрической энергии от оффшорных ВЭУ на основе сжатого воздуха и метана; на основе использования холода - «ночной ветер»; кинетические накопители энергии - маховики;

2) Имеют свою область наиболее целесообразного применения электрохимические накопители: свинцово-кислотные, никель-кадмиевые, никель-металлогидридные, литий-ионные, натрий-серные, импульсные электроаккумуляторы, а также аккумуляторные батареи большой энергоёмкости; проточные редокс-накопители, гальванические и топливные элементы; емкостные накопители энергии: импульсные конденсаторы, молекулярные накопители энергии – суперконденсаторы;

3) Для каждого конкретного случая на основе индивидуального технико-экономического обоснования могут быть использованы наилучшим образом: индуктивные накопители электрической энергии, включая сверхпроводящий; магнитогидродинамические, в том числе импульсные ми жидкометаллические; электромашинные преобразователи на основе синхронных, униполярных и компрессионных генераторов;

4) Накопители электроэнергии большой мощности, в том числе гибридные могут быть рекомендованы для технологии интеллектуальных электрических сетей;

5) Стационарные системы накопителей энергии могут устанавливаться на подстанциях и в серединах фидерных зон. Установка в середине фидерных зон будет способствовать лучшей стабилизации напряжения в сети по сравнению с вариантом установки на подстанциях, однако технические условия для размещения данного оборудования на подстанциях более предпочтительны.

3 Применение накопителей энергии в различных отраслях

Накопитель энергии также может быть эффективно использован при решении различных задач.

Применение накопителей энергии НЭ совместно с малой генерацией на органическом топливе (ДГУ, ГПУ, ГТУ) позволяет: обеспечить работу объектов малой генерации с постоянной, наиболее экономичной нагрузкой; снижение затрат топлива, в среднем, на 15–20 %, улучшение экологической обстановки; улучшить динамические характеристики установок малой генерации; стабилизировать напряжение и частоту при сбросах и набросах нагрузки; обеспечить бесперебойное снабжение потребителей при пусках и остановах объектов малой генерации.

Накопители электрической энергии являются важнейшим элементом активно-адаптивных сетей будущего. Применение накопителей энергии в энергосистемах, содержащих ВИЭ позволяет: выравнивание графиков нагрузки в сети - накопление электрической энергии в периоды наличия избыточной и дешевой энергии и выдачу в сеть в периоды дефицита; обеспечение повышения надежности сети; отсрочка расширения мощности сети; обеспечение бесперебойного питания особо важных объектов, собственных нужд электростанций и подстанций; сглаживание колебаний мощности, стабилизации работы малоинерционных систем распределенной генерации.

Применение НЭ в системе тягового электроснабжения позволит: уменьшить установленную мощность понижающих и преобразовательных трансформаторов тяговых подстанций; уменьшить расход энергии на тягу за счет использования избыточной энергии рекуперации на тягу поездов; снизить потери электроэнергии в тяговой сети.

3.1 Особенности выбора накопителя для систем с ВИЭ

Рассмотренные ранее типы накопителей и их применения весьма разнообразны. Рекомендовать какую-либо аккумулирующую систему для всех типов энергоустановок на основе ВИЭ невозможно. Тем не менее, можно сформулировать некоторые требования и ограничения, облегчающие выбор накопителя для своей системы. Так, например, если речь идет необходимости регулирования энергетических потоков в системе, где их мощность исчисляется десятками и сотнями МВт, нет смысла применять дорогие и маломощные электрохимические накопители, если только речь не идет о распределении их между конечными потребителями мощностью 10-100 кВт и последующей согласованной работе под единой системой управления. Задача управления крупными энергетическими потоками мощного ВЭУ-парка, крупной приливной электростанции или

территориального комплекса на основе ВИЭ в масштабах региона может быть решена за счет применения ГАЭС или НЭСВ, а в ряде случаев – водородного цикла с тепловым двигателем. Применение водородного цикла целесообразно в системах, для которых характерна большая энергоемкость при малой мощности и есть ограничения по объему и массе накопителя. В отсутствие последних имеет смысл применение проточных редокс-накопителей с целью повышения кпд системы и отказа от работы с взрывоопасными газами в сосудах под давлением. В нише малых энергоустановок с ВИЭ пока доминируют СКА, однако постоянное развитие ЛИА в направлении повышения безопасности и снижения цены, как за счет применения новых материалов, так и наращивания объемов производства вкупе с такими «врожденными» недостатками СКА как малая энергоемкость, низкая допустимая глубина разряда и малый ресурс в конечном итоге может привести к частичному вытеснению их ЛИА. Применение СК, маховиков и адиабатических НЭСВ целесообразно в системах с быстропротекающими процессами, причем ранжирование этих трех технологий в порядке убывания мощности следующее: НЭСВ, маховики, СК. Наконец, в сложных системах с различными требованиями могут быть применены гибридные накопители электрической энергии, включающие в себя комбинации различных технологий, объединенные единой системой преобразования и управления.

3.2 Структура системы накопления энергии

Чтобы НЭ обеспечивал дальнейшее использование накопленной энергии он должен включать в себя три функциональных блока: устройство преобразования мощности; систему управления потоком мощности; аккумулирующий элемент, непосредственно запасающий и хранящий энергию.

Система преобразования мощности связывает энергосистему с аккумулирующим элементом и управляет перетоком энергии между ними.

Система управления перетоком мощности должна иметь способность управлять балансом перетоков в режиме реального времени, при этом необходимо учитывать требование по точности оценки состояния электроэнергетической системы для достижения оптимального режима функционирования.

Различные типы электрохимических накопителей энергии используют различные виды химических источников тока, поэтому их прямое сопоставление затруднительно. Поэтому, необходимо выбрать общие для всех типов электрохимических НЭ параметры и проводить сопоставление с их использованием: стоимость удельных энергии и мощности; удельная энергоемкость; срок службы; КПД; число циклов заряд-разряд; влияние на окружающую среду.

По описанным выше типам электрохимических НЭ предложенные показатели сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Электрохимические накопители энергии

Тип АКБ Параметр	СКА	NiCd	NaS	Li-ion	Супер-конденса-тор
Стоимость, у.е./кВт*ч	200-1100	650-2300	230-950	650-2900	100-250
Стоимость, у.е./кВт	350-850	650-1400	1000-2700	1300-3800	250-650
Плотность, Вт*ч/кг	30-60	45-80	100-160	120-200	3-10
Срок службы, циклы	160-1200	1200-2800	1700-3000	2900-5500	10000-100000
КПД, %	75	80	81	96	95
Экологичность	Загрязнение свинцом	Токсичны	Нетоксичны	Нетоксичны	Экологи-чески безопасны
Саморазряд,% в мес.	5	20	0	5	300

3.3 Накопитель сетевой электроэнергии - аккумулятор от 1 МВт

Энергоснабжение и экономия электроэнергии чрезвычайно актуальны в современных условиях развития промышленности, экономики и современных городов.

Предназначение сетевых накопителей (АББМ) - это повышение эффективности использования энергетических сетей и энергосбережение, за счет аккумулирования (резервирования) энергии и выдачи ее потребителям в необходимое время.

Сетевой накопитель или АББМ - это принципиально новый этап в развитии энергетических систем. Батареи специально спроектированы для систем потребляющих достаточно много электроэнергии.

Изготавливаются они – модулями и/или контейнерного типа. В зависимости от количества модулей, их мощность может колебаться от 0,2 до сотен мегаватт**.**

Достоинством батарей является несравнимо большая мощность при малом времени на зарядку (4-6 часов) и большом времени полного разряда

в зависимости от нагрузки – до 8-10 суток.

Могут изготавливаться как стационарными, так и передвижными: на автоприцепе, ж/д платформе и т.п. Быстрый монтаж и ввод в эксплуатацию. Гарантийный срок работы – более 15 лет.

3.4 Сетевой накопитель электроэнергии 100 кВт

Накопитель для систем резервного электропитания, ветро- и солнечной энергетики, электросетей. Накопитель имеет промышленное исполнение и смонтирован в защищенном шкафу. Включает в себя также системы защиты и контроля заряда батареи. Идеально подойдет для проектов, в которых требуются компактные габариты, высокая надежность и долговечность.

Номинальная мощность - 88 кВт*ч; мощность - 93 кВт* ч; емкость - 75 А/ч; номинальное напряжение - 621 В; диапазон напряжения - 505-705 В; постоянный ток - 150 А; непрерывный ток заряда\разряда - 88 А.

Стойки открытого типа; защита от короткого замыкания; заряд/разряд КПД: 96%; вентилятор; самостоятельная скорость разряда: менее 1% в месяц; защита от перегрузки по току; защита от перенапряжения; защита от перегрева; требуется внешний источник питания постоянного тока; сейсмическая категория 4

3.5 Термодинамический накопитель энергии

Назначение накопителя. Накопление, кратковременное хранение (от нескольких часов до нескольких дней) и возврат значительных объемов электроэнергии. Емкость накопителя от 10 МВт-час до нескольких ГВт-часов.

Применение накопителя.

В энергосистемах: сглаживание суточной неравномерности нагрузки энергосистем за счет накопления энергии в период ночного провала потребления и выдачи энергии в период дневных пиков потребления.

Совместно с маломаневренными генерирующими мощностями: адаптация маломаневренных базовых генерирующих мощностей, например, таких как АЭС, к энергосистемам со значительной переменной составляющей в графике потребления.

Совместно с потребителями со значительной переменной составляющей в графике потребления: повышение средней пропускной способности для ЛЭП, потребителей с неравномерным графиком потребления электроэнергии; снижение мощности подключения для потребителей с неравномерным графиком потребления электроэнергии.

Совместно с генерирующими мощностями на ВИЭ: с ветроэлектростанциями; с солнечными электростанциями на фотоэлементах.

3.6 Накопитель энергии в устройстве стабилизированного питания электроприемника

Устройство поддержания стабилизированного питания электроприемника, содержащее преобразователь переменного напряжения в постоянное, к выходу которого подключен накопитель резервной энергии, отличающееся тем, что дополнительно содержит устройство определения аварийного процесса, включающее в себя блок преобразователей сигналов, первый выход которого подключен к входу управляемого ключа канала напряжения, последовательно соединенного с устройством слежения за уровнем сигнала напряжения, генератором прямоугольных импульсов канала напряжения, блоком управления коммутирующим устройством канала напряжения, второй выход блока преобразователей сигналов подключен ко входу управляемого ключа канала тока, последовательно соединенного с устройством слежения за уровнем сигнала тока, генератором прямоугольных импульсов канала тока, блоком управления коммутирующим устройством канала тока, также содержит управляемый переключатель, первый вход которого соединен с выходом преобразователя переменного напряжения в постоянное, второй вход соединен с выходом накопителя резервной энергии, в качестве которого использован блок ионисторов, а выход соединен с потребителем электрического тока.

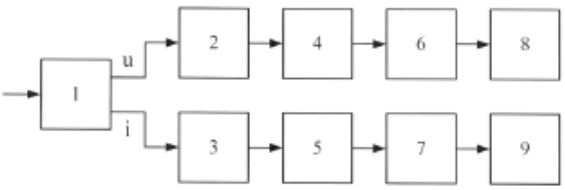


Рис. 32 - Схема устройства определения аварийного процесса

Полезная модель относится к устройству для аварийного или резервного энергоснабжения, в котором распределительная система автоматически отключается от нормального источника и подключается к резервному источнику. Полезная модель может быть использована на предприятиях в установках с использованием систем автоматического управления тиристорными электроприводами постоянного тока, где важную роль играет строго стабилизированное напряжение питания электроприемника.

Известно устройство источника бесперебойного питания, содержащее силовой преобразователь, непосредственно подключенный к электроприемнику, накопитель резервной энергии, подключенный к

электроприемнику через управляемый переключатель, выполненный на базе тиристора с блоком управления, а также измерительный компаратор, подключенный по выходу к блоку управления, снабжен датчиком наличия питающей сети, выход которого подключен к блоку управления тиристора и контактора, нормально разомкнутые контакты которого включены параллельно тиристору, а вход измерительного компаратора подключен к накопителю резервной энергии.

К недостатку данного устройства можно отнести невозможность отличать внешний провал напряжения от провала напряжения, вызванного внутренним коротким замыканием электроприемника.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому устройству является устройство источника бесперебойного питания потребителей, содержащее преобразователь переменного напряжения в постоянное, накопитель резервной энергии.

К недостатку данного устройства также можно отнести невозможность отличать внешний провал напряжения от провала напряжения, вызванного внутренним коротким замыканием электроприемника.

Задачей заявляемой полезной модели является расширение функциональных возможностей устройства за счет его возможности отличать внешний провал напряжения от провала напряжения, вызванного внутренним коротким замыканием электроприемника.

Поставленная задача достигается тем, что в известном устройстве, содержащем преобразователь переменного напряжения в постоянное, к выходу которого подключен накопитель резервной энергии, согласно полезной модели, устройство дополнительно содержит устройство определения аварийного процесса, включающее в себя блок преобразователей сигналов, первый выход которого подключен ко входу управляемого ключа канала напряжения, последовательно соединенного с устройством слежения за уровнем сигнала напряжения, генератором прямоугольных импульсов канала напряжения, блоком управления коммутирующим устройством канала напряжения, второй выход блока преобразователей сигналов подключен ко входу управляемого ключа канала тока, по следовательно соединенного с устройством слежения за уровнем сигнала тока, генератором прямоугольных импульсов канала тока, блоком управления коммутирующим устройством канала тока, также содержит управляемый переключатель, первый вход которого соединен с выходом преобразователя переменного напряжения в постоянное, второй вход соединен с выходом накопителя резервной энергии, в качестве которого использован блок ионисторов, а выход соединен с потребителем электрического тока.

На рис. 33 - функциональная схема устройства поддержания стабилизированного питания.

Функциональная схема устройства определения аварийного процесса (рис. 32) содержит блок преобразователей сигналов 1, первый выход которого соединен со входом управляемого ключа канала напряжения 2, выход которого соединен со входом устройства слежения за уровнем сигнала напряжения 4, которое выходом соединено со входом генератора прямоугольных импульсов канала напряжения 6, выход которого соединен со входом блока управления коммутирующим устройством канала напряжения 8, второй выход блока преобразователей сигналов 1 соединен со входом управляемого ключа канала тока 3, выход которого соединен со входом устройства слежения за уровнем сигнала тока 5, которое выходом соединено со входом генератора прямоугольных импульсов канала тока 7, выход которого соединен со входом блока управления коммутирующим устройством канала тока 9.

Устройство (рис. 33) содержит преобразователь переменного напряжения в постоянное 10, один выход которого подключен к первому входу управляемого переключателя 12, а второй выход подключен к накопителю резервной энергии 11, выход которого подключен ко второму входу управляемого переключателя 12, который выходом подключен к потребителю электрического тока 13.

Полезная модель работает следующим образом. В нормальном режиме электрической сети потребитель электрического тока 13 штатно получает питание выпрямленным током из преобразователя переменного напряжения в постоянное 10 через управляемый переключатель 12. Устройство определения аварийного процесса посредством устройств слежения за уровнем сигналов напряжения 4 и тока 5, выполненных на базе двухпорогового компаратора, следит за уровнем соответствующих входных параметров электропитания потребителя электрического тока 13. Сигналы напряжения и тока по соответствующим каналам "u" и "i" из блока преобразователей сигналов 1 поступают на устройства слежения за уровнем сигналов напряжения 4 и тока 5 (рис. 32) через управляемые ключи 2 и 3 (рис. 32) соответствующих каналов, которые находятся в нормально замкнутом состоянии. В момент снижения уровня напряжения, вызванного провалом напряжения, на выходе устройства слежения за уровнем сигнала напряжения 4 (рис. 32) появляется импульс, который поступает на генератор прямоугольных импульсов канала напряжения 6 (рис. 32), представляющий собой одновибратор, который, в свою очередь, формирует прямоугольный сигнал заданного времени.

Сигнал поступает на блок управления коммутирующим устройством канала напряжения 8 (рис. 32), вследствие этого происходит автоматический перевод управляемого переключателя 12 и перевод управляемого ключа 3 (рис. 32) в открытое состояние. Таким образом, потребитель электрического тока 13 получает питание от накопителя резервной энергии 11, который представляет собой блок заряженных ионисторов, а канал тока "i" устройства определения аварийного процесса находится в выключенном

состоянии. По окончании заданного времени прямоугольного сигнала генератора прямоугольных импульсов канала напряжения 6, блок управления коммутирующим устройством канала напряжения 8 (рис. 32) переводит управляемый переключатель 12 и управляемый ключ 3 в исходные положения. В случае, когда провал напряжения происходит вследствие внутреннего короткого замыкания потребителя электрического тока 13, устройство определения аварийного процесса реагирует посредством устройства слежения за уровнем сигнала тока 5 (рис. 32). Алгоритм работы канала тока "i" аналогичен алгоритму работы канала напряжения "u", за исключением действия блока управления коммутирующим устройством канала тока 9. При поступлении на блок управления коммутирующим устройством канала тока 9 прямоугольного сигнала заданного времени происходит автоматический перевод управляемого ключа 2 (рис. 32) в открытое состояние, для вывода из работы канала напряжения "u". Таким образом, потребитель электрического тока 13 останется питаться штатно до момента, когда встроенная защита от короткого замыкания не отключит его от сети.

Применение: в блоках стабилизированного питания САУ электроприемников, где используется постоянное напряжение 24 В и ниже. Класс напряжения ограничен только техническими параметрами накопителя резервной энергии.

Достоинства: способно распознавать провал напряжения сети; провал напряжения, вызванный внутренним коротким замыканием электроприемника; простотой изготовления и доступностью комплектующих элементов; низкими экономическими затратами; низкими энергетическими затратами.

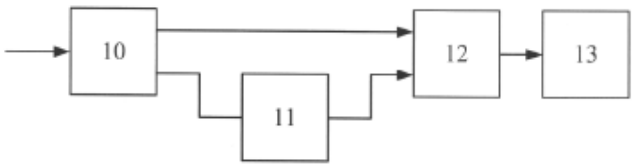


Рис. 33 - Функциональная схема устройства поддержания стабилизированного питания

3.7 Емкостной накопитель в системе динамического нагружения двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Одно из направлений совершенствования электромеханических систем - ЭМС разного рода заключается в использовании НЭ и, прежде всего, накопителей электрической энергии – емкостных накопителей. Область применения ЭМС с емкостными накопителями – промышленные и транспортные системы с резкопеременной и знакопеременной нагрузкой.

Они могут быть использованы в системах динамического нагружения - СДН электрических машин при их испытании и, в частности, испытаний ДНВ. Основная задача накопителей-компенсаторов энергии в СДН заключается в потреблении (накоплении) энергии в моменты генерации ее двигателем с последующим разрядом ее в цепь ДНВ, что приводит к уменьшению мощности источника питания за счет введения дополнительного силового канала в якорной цепи. К числу малоизученных вопросов при создании СДН с емкостными накопителями следует отнести создание систем управления, обеспечивающих передачу энергии от электрической машины к накопителю и обратно.

Цель - выбор оптимального режима заряда емкостного накопителя с учетом высокого КПД и плавности регулирования. Рассмотрены процессы заряда при использовании тормозного резистора в системе ДНВ – емкостной накопитель энергии. Однако КПД при прямой передаче энергии независимо от величины сопротивления тормозного резистора равен 0,5 (значительная часть энергии рассеивается в виде тепла на тормозном резисторе). В качестве токоограничивающего элемента может также использоваться катушка индуктивности, при этом КПД заряда может быть высоким при максимальном токе заряда. Регулирование зарядного тока является радикальным средством снижения потерь в силовой цепи при переходных процессах, при этом ток в якорной цепи не превышает допустимых значений. Одним из методов для достижения данных целей является регулирование магнитного потока ДНВ. Из полученных результатов видно, что при регулировании коэффициента потока регулируется количество передаваемой энергии от ДНВ, работающего в генераторном режиме, в накопитель. Используя различные законы управления, можно добиться варианта, когда КПД при передаче энергии изменится относительно рассчитанного ранее, что приведет к изменению потребляемой компенсационной энергии из сети при разрядно-зарядных процессах в системе «ДНВ–накопитель».

В качестве одного из вариантов регулирования зарядного тока приводится использование прерывателя между батареей ионисторов и ДНВ. Данный прерыватель позволяет регулировать и поддерживать среднее значение зарядного тока на всем периоде заряда накопителя. При регулировании тормозного тока может использоваться один из методов импульсного регулирования: широтно-импульсный или частотно-импульсный. Также можно осуществить ступенчатое регулирование зарядного тока, установив определенный порядок включения ключей. Вариант с использованием широтно-импульсного регулятора является предпочтительным, поскольку достигается большая плавность регулирования и надежность системы (наличие блока управления ключами).

Таким образом, возможно контролировать ток якоря и интенсивность передачи энергии в разрядно-зарядных процессах посредством изменения электродинамической емкости при формировании заданных законов управления в обмотке возбуждения двигателя постоянного тока или

посредством совместного управления IGBT-транзисторов в обмотке возбуждения и якорной цепи.

3.8 Использование накопителей энергии для улучшения параметров локомотивов

В настоящее время на железнодорожном транспорте основным автономным источником питания электрических цепей управления и пуска дизелей, а также резервным источником питания являются А и АКБ трех классов: быстрого (H), среднего (M) и длительного разряда (L).

Аккумуляторы быстрого разряда применяются как стартерные: для пуска двигателей внутреннего сгорания тепловозов, рефрижераторных вагонов, дизель-поездов и стационарных электроагрегатов.

Аккумуляторы среднего класса используются в качестве основного источника энергии на пассажирских вагонах и рефрижераторных секциях при низких скоростях движения и на стоянках.

Аккумуляторы длительного разряда применяются как резервный источник в агрегатах бесперебойного питания при основной сети переменного тока или в буфере с основным энергоисточником постоянного тока в устройствах СЦБ и связи, а также во вспомогательных низковольтных цепях электроподстанций и других стационарных установок железнодорожного транспорта. Все А подразделяются также по типу используемой электрохимической системы: щелочной или кислотной. Основными типами выпускаемых А для подвижного состава являются свинцово-кислотные и щелочные А. Применяемые на подвижном составе АКБ по своему функциональному назначению подразделяются на тяговые (для питания тяговых двигателей) и стартерные. В качестве стартерных (быстрого разряда) эффективнее использовать мощные кислотные А, в качестве тяговых (среднего разряда) – щелочные, особенно НКА, которые лучше работают при низких температурах наружного воздуха и обладают большим сроком службы. В то же время при одинаковых массогабаритных и мощностных показателях свинцово-кислотные А значительно дешевле щелочных.

Аккумуляторы для тепловозов. АКБ для тепловозов используются для питания тягового генератора при запуске дизеля, а также для освещения тепловоза и низковольтного питания цепей управления при неработающем дизеле. Основными типами выпускаемых АКБ для тепловозов являются свинцовокислотные 32ТН–450У2, 48ТН–450У2, 48ТН–350У2 и щелочные 46ТПНЖ–550У2, 46ТПНК–550Т2. Цифры и буквы характеризуют следующие технические данные батареи: 32, 46, 48 – количество последовательно соединенных А в батарее, шт.; 350, 450, 550 – номинальная емкость входящих в батарею А при определенном режиме разряда, А–ч; Т, ТП – назначение А – тепловозный (пусковой); Н – вид электродных пластин

А по способу нанесения на свинцовую решетку рабочего вещества – намазные; НЖ, НК – электрохимическая система А: никельжелезный, никель-кадмиевый; У2, Т2 – для умеренного и тропического климата с размещением в шкафу, кожухе.

Аккумуляторы для электровозов. На электровозах и электропоездах АКБ предназначены для питания низковольтных цепей управления, защит, сигнализации, дежурного освещения при неработающих генераторах управления или неработающем блоке питания. АКБ служат для питания мотор-компрессора, подающего сжатый воздух для подъема токоприемника при отсутствии сжатого воздуха в главных резервуарах. В случае выхода из строя генератора управления в пути или подготовке локомотива к эксплуатации АКБ служит резервным источником питания. В условиях эксплуатации на железнодорожном транспорте АКБ присущ общий недостаток, который проявляется в существенном уменьшении емкости при низких наружных температурах. Разработка надежных и экономичных автономных источников питания электроустановок, в том числе и для подвижного состава, всегда является актуальной задачей. Продолжаются поиски эффективных технических решений по топливо - и энергосберегающим технологиям для остановки и пуска тепловозных дизелей, разработке новых вспомогательных источников питания для управления работой дизеля на холостом ходу и т.д. Создаются гибридные маневровые тепловозы, в которых при модернизации дизель-генераторная установка локомотива заменяется АКБ и дизель-генераторной установкой значительно меньшей мощности. Тяговые двигатели модернизированного локомотива питаются от АКБ, а дизель-генераторная установка используется только для постоянного подзаряда батарей. Благодаря эксплуатации в указанном режиме дизель работает с постоянной частотой вращения, а уровень заряда батарей не понижается ниже 80 %.

Проводятся работы по агрегатной компоновке АКБ. Аккумуляторы собраны в виде отдельного компактного блока с выдвижными модулями. Централизованная система контроля и ухода за А обеспечивает их повышенную надежность, готовность к работе и снижает расходы по их обслуживанию. Подобные интегрированные А уже начали поставляться на железные дороги Франции, Германии, Швеции, других европейских стран, а также России и СНГ. Новые А не требуют больших затрат по уходу.
Дистиллированную воду в них нужно заливать лишь один раз в два года. Корпуса аккумуляторов выпоняются из полипропилена, огнестойкого полиамида, легко демонтируются и выкатываются из-под локомотива. После выработки срока эксплуатации А отправляют на заводы-изготовители для утилизации.

Подобные наработки имеются и в автомобильной промышленности при разработке электромобилей. Процесс выкатки и замены разряженной АКБ на свежезаряженные для электромобилей полностью роботизирован и занимает считанные минуты.

Другим направлением повышения надежности АКБ локомотива является автоматизированное диагностирование и мониторинг параметров ее технического состояния при обслуживании. Это достигается применением специальных устройств и технологии диагностирования параметров АКБ, возможностью восстановления изношенных аккумуляторов и использованием программных средств автоматизации диагностирования и мониторинга технического состояния АКБ локомотивов. Широко применяемые щелочные А имеют неоспоримое преимущество перед кислотными А, однако содержат - кадмий. Кадмий способен накапливаться в организме человека и приводит к серьезным заболеваниям. Кроме того, кадмий и его соединения экологически опасны. При эксплуатации А образует ся аэрозоль гидроксида кадмия, которая осаждается на поверхности АКБ, аккумуляторных ящиков и загрязняет окружающую среду. Поэтому активизируются работы по разработке необслуживаемых гелевых А.

Проблемы аккумулирования энергии при автономной тяге рассматривались специалистами и ранее, однако практическое решение этого вопроса было сопряжено с рядом технических трудностей, состоящих главным образом в отсутствии технологий и материалов для создания эффективных преобразователей и накопителей энергии повышенной энергоемкости, обладающих к тому же достаточно высокой надежностью.

Применение подобных систем часто оказывалось экономически нецелесообразным из-за их высокой стоимости, в связи с чем затраты на внедрение этих систем перекрывали ожидаемую экономию топлива от их использования.

Последние достижения науки и техники позволяют взглянуть по-новому на рассматриваемую проблему.

В современных условиях, наряду с повышением производительности локомотивов, все большую важность приобретает экономия топливно-энергетических ресурсов, повышение надежности и экологической эффективности. В настоящее время на сети железных дорог России и СНГ эксплуатируется значительное количество локомотивов, выработавших свой ресурс. Разработка нового подвижного состава и замена им устаревших локомотивов связана со значительными материальными затратами, поэтому особое значение приобретает совершенствование существующих локомотивов. Основной целью модернизации эксплуатируемых и создания новых локомотивов является повышение их производительности и/или энергетической эффективности, способствующих сокращению расхода топлива на тягу поездов и при простое с работающей силовой установкой.

Одним из перспективных и кардинально новых направлений являются молекулярные накопители электрической энергии – суперконденсаторы СК. Они обладают емкостью от единиц до тысячи фарад.

СК уже освоены промышленностью и имеют высокие технико-экономические характеристики. Они могут применяться в импульсном кратковременном режиме и в режиме длительного заряда. В СК не

происходят внутренние химические реакции, малы потери и поэтому коэффициент отдачи близок к единице; ресурс более 10^4…10^7 циклов и срок службы 12 лет. Выпускаемые СК имеют закрытую конструкцию и не требуют обслуживания в течение всего срока эксплуатации.

Накопители можно разделить на несколько основных групп.

Накопители серии ПП являются низковольтными, до 24 вольт, но при этом имеют высокую емкость и малое внутреннее сопротивление.

Накопители ИКЭ рассчитаны на большое напряжение, но при этом имеют емкость 1…2 Ф и достаточно большое внутреннее сопротивление.

Накопители ЭК по своей конструкции занимают промежуточное положение между СК и аккумуляторами. Их энергоемкость на порядок больше, чем у накопителей других серий. Однако НЭ серии ЭК не допускают изменения полярности подведенного напряжения. Как и А, их нельзя разряжать полностью. На железнодорожном транспорте НЭ уже нашли применение. Их устанавливают на некоторых тепловозах, где они обеспечивают надежный запуск дизеля при низких температурах и при разряженной АКБ. При этом накопитель значительно продлевает срок службы батареи и позволяет использовать более дешевую батарею меньшей емкости.

На электроподвижном составе СК пока не применяются.

Конденсаторные накопители большой емкости подключаются параллельно обмотке возбуждения каждого тягового двигателя тепловоза. При этом улучшаются противобуксовочные свойства двигателя последовательного возбуждения и сохраняются его мягкие характеристики. Конденсаторы большой емкости также начинают применяться для конденсаторных систем пуска (КСП) дизелей локомотивов, особенно при изношенных АКБ и пониженных температурах окружающей среды.

КСП предназначены для повышения надежности, увеличения ресурса систем запуска дизелей, улучшения условий эксплуатации и обслуживания локомотивов и обладают следующими достоинствами: запуск дизеля производится даже при снижении напряжения батареи до 40–30 вольт; стартовая мощность КСП в 10 раз превышает мощность штатных аккумуляторных батарей; гарантированный быстрый запуск дизеля, в т.ч. в условиях низких температур, позволяет добиваться значительной экономии топлива, особенно на предприятиях промышленного транспорта с циклическим характером технологических перевозок; позволяет значительно сократить потребную емкость АКБ и заменить их на более дешевые; срок службы КСП – до 15 лет; количество зарядно-разрядных циклов – 2 млн; пожаро-, взрывобезопасны, не содержат токсичных веществ; не требует специального ухода.

Конденсаторная система КСП–75 с накопителями энергии МНЭ–25/75 предназначена для использования в составе системы пуска дизелей локомотивов с напряжением цепей управления 75 В и номинальным напряжением АКБ 64 В; КСП–9/110 - для использования в составе системы

пуска с напряжением цепей управления 110 В и номинальным напряжением аккумуляторной батареи 96 В.

Для железных дорог применяются накопители пяти видов. Емкостные накопители бывают двух типов – традиционные и СК. Использование традиционного емкостного НЭ для тяговых сетей исключается из-за ограниченной удельной энергоемкости конденсаторов. В настоящее время более интенсивно ведутся работы по созданию и внедрению электрохимических конденсаторов. Эти конденсаторы реализуют процесс накопления заряда в двойном электрическом слое на поверхности контакта электрода и электролита.

Они имеют такие преимущества, как наибольшая из всех разновидностей А объемная и весовая плотность мощности, долговечность свыше 10 лет и 100000 циклов заряда–разряда, низкий показатель саморазряда – до 10 % в месяц, высокий КПД – более 95 %. В настоящее время создан ряд промышленных НЭ на базе электрохимических конденсаторов с запасаемой энергией 48 и 112 кДж, напряжением – 30 и 45 В, емкостью – 300 и 240 Ф, массой – 18 и 27 кг соответственно.

Высокая удельная энергия и мощность электрохимических конденсаторов позволили создать НЭ, который по многим параметрам превосходит традиционные стартерные АКБ. Электрохимические конденсаторы могут эффективно применяться для пуска больших дизельных двигателей, оптимальны для процессов, требующих высоких мощностей, например, прокрутка вала двигателя в начальный момент пуска. Примером маневрово-вывозного тепловоза с гибридной силовой установкой является тепловоз ТЭМ9Н SinaraHybrid. Он представляет собой четырехосный локомотив с электрической передачей переменного тока, индивидуальным приводом колесных пар с суммарной мощностью 1200 л.с. Локомотив оборудован литий-ионными НЭ и суперконденсаторами. Новый тепловоз способен на 40 % сократить потребление дизельного топлива. Применение НЭ, способных воспринимать резко переменные нагрузки при одновременной стабилизации режима работы двигателя, позволит повысить надежность, экологические показатели, экономические показатели тепловоза.

3.9 Использование накопителей энергии на тяговых подстанциях постоянного тока

Система относится к области железнодорожного транспорта, электрифицированного по системе постоянного тока, содержащей тяговые подстанции (ТП), преобразующие трехфазный переменный ток, получаемый из энергосистемы, в постоянный ток, поступающий через контактную сеть к электроподвижному составу как снабженному системой рекуперации, так и без нее. Тяговая подстанция постоянного тока со сверхпроводниковым индуктивным накопителем содержит силовой трансформатор, выпрямитель,

сглаживающий фильтр с реактором, блок конденсаторов, сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии, четыре криотрона, шесть полупроводниковых управляемых ключей, блок управления криотронами и полупроводниковыми ключами, датчики тока и напряжения. система позволит частично или полностью устранить неравномерность энергопотребления в системе, поддерживать на заданном уровне мощность ТП во время эксплуатации, уменьшить потери энергии во внутренней и внешней системе электроснабжения, снизить мощности агрегатов ТП, принимать энергию рекуперации.

Известна тяговая подстанция постоянного тока, содержащая силовой трансформатор, выпрямитель, выпрямительно-инверторный преобразователь (или поглощающие устройства), сглаживающий фильтр с реактором.

Данное устройство подстанции имеет следующие недостатки: при инвертировании избыточной энергии рекуперации в первичную сеть имеют место значительные потери энергии; при инвертировании создается повышенное мешающее влияние на линии связи и радиоаппаратуру, так как выпрямительно-инверторные преобразователи в этом режиме работают со сравнительно большими углами регулирования; качество инвертируемой энергии не соответствует ГОСТ; при применении поглощающих устройств, избыточная энергия гасится на балластных сопротивлениях, что является чистыми потерями электроэнергии.

Известна тяговая подстанция постоянного тока с батарейным накопителем. Указанная система содержит силовой трансформатор, преобразователи, выпрямитель, накопитель (свинцовая аккумуляторная батарея), соединенный с узлами подачи электроэнергии в контактную сеть через регулятор постоянно-постоянного тока.

К недостаткам указанной тяговой подстанции следует отнести: конструкция накопителя содержит большое количество контактных соединений, что снижает надежность устройства в целом; значительные потери энергии при ее хранении из-за саморазряда аккумуляторной батареи; применение технически сложного регулятора постоянно-постоянного тока.

Наиболее близким по своей технической сущности является тяговая подстанция переменного тока со сверхпроводниковым индуктивным накопителем.

Эта тяговая подстанция содержит силовой трансформатор, фильтр, преобразователь переменного тока в постоянный, состоящий из четырехквадрантного регулятора, промежуточного контура постоянного напряжения с поглощающей цепью и импульсного регулятора постоянного тока, сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии - СПИН, соединенный со сборной шиной через преобразователь постоянного тока в постоянный с промежуточным звеном постоянного тока и силовой трансформатор.

Указанная тяговая подстанция не позволяет принимать избыточную энергию рекуперации, имеет сложную громоздкую структуру с

многократным преобразованием энергии в силовой части, что снижает надежность работы схемы и вызывает значительные потери энергии в преобразователях.

Техническим результатом является: сокращение потерь энергии во внутренней и внешней системе электроснабжения и расходов энергии, получаемой из энергосистемы на тягу; упрощение конструкции ТП постоянного тока за счет исключения инверторного блока; повышение надежности работы ТП со СПИН.

Сокращение потерь энергии достигается за счет того, что СПИН являться А энергии, который принимает энергию от системы внешнего электроснабжения в период спада тяговой нагрузки и передает ее в тяговую сеть при значительном ее увеличении. Этим выравнивается режим потребления энергии от внешней системы, что приводит к снижению потерь. Сокращение расходов энергии, получаемой из энергосистемы на тягу, осуществляется за счет приема энергии рекуперации СПИН с последующим возвратом ее на тягу.

Упрощение ТП постоянного тока обеспечивается исключением из ее состава инверторного блока, поскольку эти функции переданы СПИН.

Повышение надежности работы ТП со СПИН обеспечивается за счет упрощения схемотехнического решения и сокращения числа управляющих элементов в цепи преобразования энергии.

При длительном хранении энергии все криотроны замкнуты, а полупроводниковые ключи разомкнуты. При поступлении энергии в сверхпроводниковый индуктивный накопитель второй и третий криотроны размыкаются, замыкается четвертый полупроводниковый ключ на время заряда блока конденсаторов, после чего размыкается третий и четвертый и замыкается пятый полупроводниковый ключ на время разряда блока конденсаторов на сверхпроводниковый индуктивный накопитель. А при отборе энергии - размыкается первый и четвертый криотроны, замыкается второй полупроводниковый ключ на время заряда блока конденсаторов, после чего он размыкается, и замыкаются первый и шестой полупроводниковые ключи на время разряда блока конденсаторов на контактную сеть.

Система поясняется графически на рис. 34 - 36.

На рис. 34 изображена общая схема заявляемой ТП со СПИН, на которой показаны: силовой трансформатор Т, выпрямитель тяговой подстанции В, СПИН, сглаживающий фильтр, состоящий из конденсатора $C_ф$ и реактора $L_р$, блок конденсаторов С, криотроны К1÷К4, находящиеся в холодной зоне, полупроводниковые управляемые ключи ПК1÷ПК6, блок управления БУ, система датчиков тока ДТ и напряжения ДН, электроподвижной состав ЭПС, контактная сеть КС, рельс Р.

На рис. 35 показаны временные диаграммы, поясняющие работу ТП при поступлении энергии в СПИН от ЭПС или от выпрямителя. Первые пять временных диаграмм показывают состояние ключей. Замкнутое состояние

ключей отмечено заштрихованной областью. Шестая, седьмая и восьмая временные диаграммы показывают изменение тока в СПИН ($I_{спин}$), на блоке конденсаторов (I_c) и на ЭПС ($I_{эпс}$). Девятая, десятая и одиннадцатая - изменение напряжения в СПИН ($U_{спин}$), на блоке конденсаторов (U_c) и на ЭПС ($U_{эпс}$).

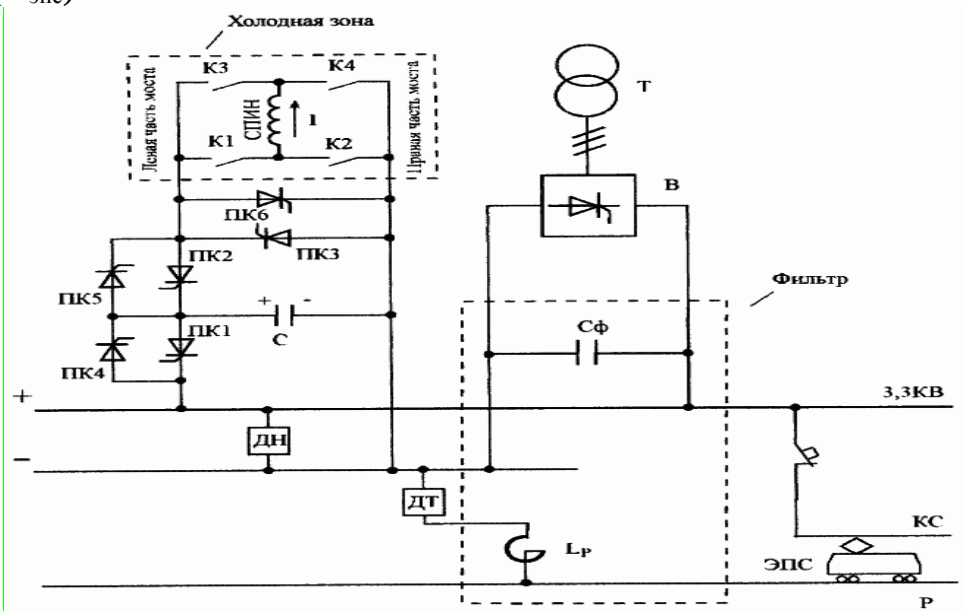


Рис.34 - Общая схема тяговой подстанции со сверхпроводниковым индукционным накопителем

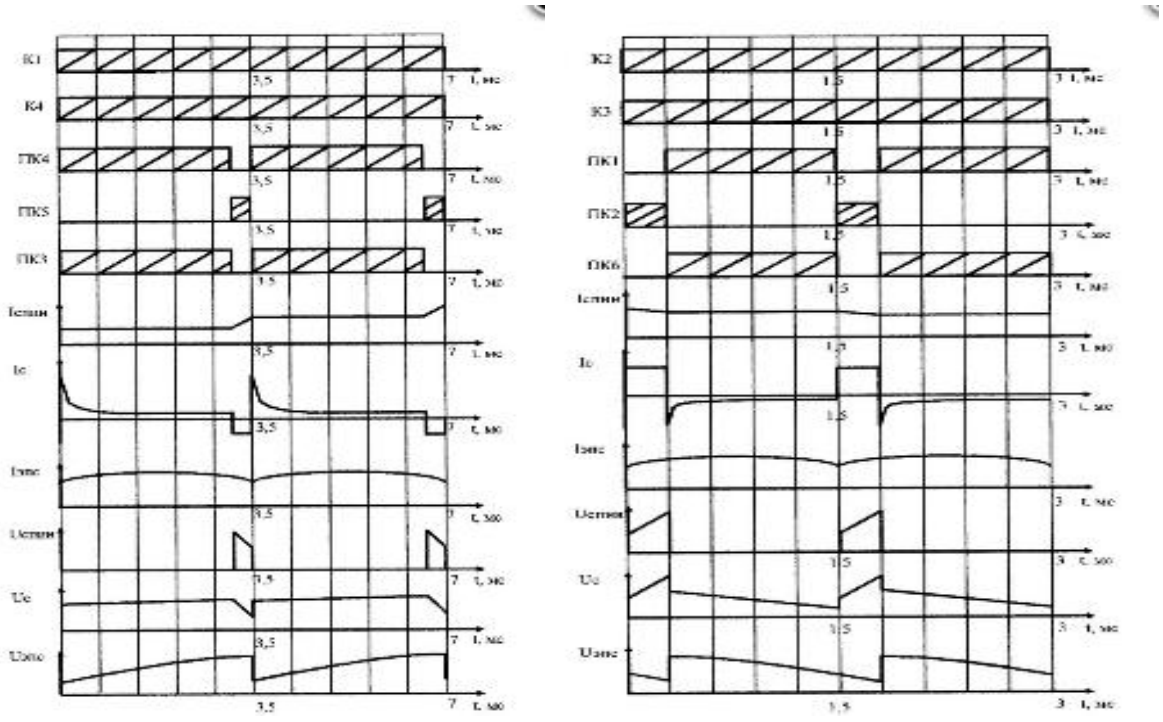


Рис. 35 - Временные диаграммы, поясняющие работу устройства: поступление энергии в СПИН (а) и отдача энергии от СПИН (б)

На рис. 35, б показаны временные диаграммы, поясняющие работу устройства при отдаче энергии от СПИН в контактную сеть. Последовательность изображения временных диаграмм такая же, как и на рис.35.

При движении ЭПС из тяговой сети потребляется ток определенной величины, соответствующий выбранному режиму работы. При рекуперации ЭПС ток, поступающий в тяговую сеть, должен быть непрерывным и по величине отвечать требуемому тормозному эффекту. При этом необходимо обеспечивать непрерывное поступление энергии в тяговую сеть, или прием энергии рекуперации из нее. Непосредственное подключение СПИН к тяговой сети приводит к противоречию, заключающемуся в том, что невозможно плавно управлять потоком энергии СПИН, так как он является источником тока. В этом случае ток в тяговой сети будет значительно превышать требуемое значение, что приведет к аварийной ситуации.

В данной тяговой подстанции указанное противоречие разрешается следующим образом: энергия от СПИН в тяговую сеть постоянного тока и обратно поступает порциями с промежуточным кратковременным ее запасом в блоке конденсаторов. При этом ток, поступающий в тяговую сеть, будет соответствовать текущему режиму работы ЭПС. Сам процесс перераспределения энергии между СПИН, блоком конденсаторов и тяговой сетью выполняется с помощью полупроводниковых ключей, находящихся вне охлаждаемой зоны и криотронов. Таким образом, наличие блока конденсаторов позволяет сделать процесс управляемым. Блок конденсаторов, получая порцию энергии на кратковременное хранение, порядка единиц миллисекунд, позволяет перевести СПИН в режим хранения энергии, когда он замкнут сам на себя, и в этот период отключать его от тяговой сети.

Устройство обеспечивает три режима работы. Первый режим - длительное хранение энергии. В этом режиме КС питается от трансформатора Т и выпрямителя В, а запасенная энергия в СПИН хранится за счет циркуляции в нем тока без потерь. Второй режим - накопление энергии в СПИН от ЭПС или от ТП. В этом режиме СПИН принимает энергию от рекуперирующего ЭПС или от ТП в период спада нагрузки. Третий режим - отдача энергии из СПИН в контактную сеть. Этот режим позволяет снизить передачу энергии от внешней энергосистемы на ТП в период пика энергопотребления на КС, за счет передачи энергии из СПИН в КС, т.е. за счет параллельной работы ТП и СПИН на КС.

Первый режим - длительное хранение энергии в СПИН и независимая работа ТП на контактную сеть.

Криотроны К1, К2, К3, К4 - замкнуты, полупроводниковые управляемые ключи ПК1, ПК2, ПК3, ПК4, ПК5, ПК6 - разомкнуты. При этом СПИН отделен от тяговой сети, замкнут сам на себя и находится в режиме длительного хранения энергии без потерь в сверхпроводящем контуре.

Второй режим - накопление энергии в СПИН от ЭПС в режиме рекуперации или от ТП.

Исходное состояние криотронов и полупроводниковых ключей - их положение, соответствующее режиму длительного хранения энергии (первому режиму). При появлении тока рекуперации или при необходимости поддержания на заданном уровне энергопотребления ТП, по сигналу блока управления БУ замыкается ключ ПК4 и энергия по пути ЭПС - Ф - ПК4 - С (в случае рекуперации) или по цепи Т - В - Ф ПК4 - С (в случае поступления энергии в СПИН от ТП) поступает в блок конденсаторов С. После завершения цикла заряда С, размыкается ПК4. Затем замыкается ПК5, после этого размыкаются на все время работы второго режима криотроны К2 и К3, вследствие чего энергия, накопленная в блоке конденсаторов С, поступает в СПИН по пути С - ПК5 - К1 -СПИН - К4 - С. После разряда блока конденсаторов до значения, близкого к нулю, блок управления БУ выдает сигнал на замыкание ПК3, размыкание ПК5 и замыкание ПК4. Это обеспечит цикл повторного заряда блока конденсаторов по описанному ранее контуру. Далее по сигналу БУ размыкается ПК4, замыкается ПК5 и размыкается ПКЗ. Начиная с этого момента идет процесс разряда С на СПИН по описанному ранее пути. Далее циклы повторяются.

Третий режим - отдача энергии из СПИН в контактную сеть. Исходное состояние ключей - положение, соответствующее режиму длительного хранения энергии (первому режиму). При необходимости поддержания на заданном уровне энергопотребления ТП, по сигналу БУ замыкается ключ ПК2, размыкаются на все время поступления энергии в тяговую сеть криотроны К1 и К4. Блок конденсаторов С заряжается по контуру: СПИН - К3 - ПК2 -С - К2 - СПИН. Далее после заряда С выше напряжения контактной сети, замыкаются ПК6 и ПК1, размыкается ПК2. Энергия, накопленная в конденсаторной батарее С, поступает в контактную сеть по цепи С - ПК1 - фильтр - КС - ЭПС. После выравнивания напряжения на блоке конденсаторов Сив контактной сети, размыкается ПК1, и процесс заряда блока конденсаторов начинается снова по описанному ранее циклу. После завершения режима выравнивания нагрузки по сигналу датчиков Д устройство переходит в первый режим путем замыкания всех криотронов К1, К2, К3, К4 и размыкания всех остальных ключей.

Для устранения неравномерности энергопотребления ТП и дозированного отбора энергии из СПИН этим потоком энергии можно управлять, изменяя соотношения времени открытого и закрытого состояния полупроводниковых ключей. Работоспособность данного устройства обеспечивается тем, что все необходимые элементы выпускаются промышленностью. Эффективную совместную работу ТП, ЭПС и СПИН во всем диапазоне нагрузок обеспечивают частотные свойства, класс по напряжению и токовые нагрузки современных полупроводниковых приборов, например IGCT 5SHY 35L4502 (производитель ABB Semiconductors AG).

3.10 Расчет и выбор ВИЭ-электроэнергетической системы с накопителем электрической энергии

Рассмотрим вариант ВИЭ-электроэнергетической системы на основе комбинации «ветроэнергетическая система-дизель-генератор-накопитель электрической энергии», схема которого приведена на рис. 36.

Система содержит: Г – генератор; РБ – регулятор балласта; В – выпрямитель; БН – блок балластных сопротивлений; АБ – аккумуляторная батарея; И – инвертор; Н – полезная нагрузка; ДД – дизельный двигатель; СГ – синхронный генератор; СШ – сборная шина; РА – регулятор аккумуляторной батареи.

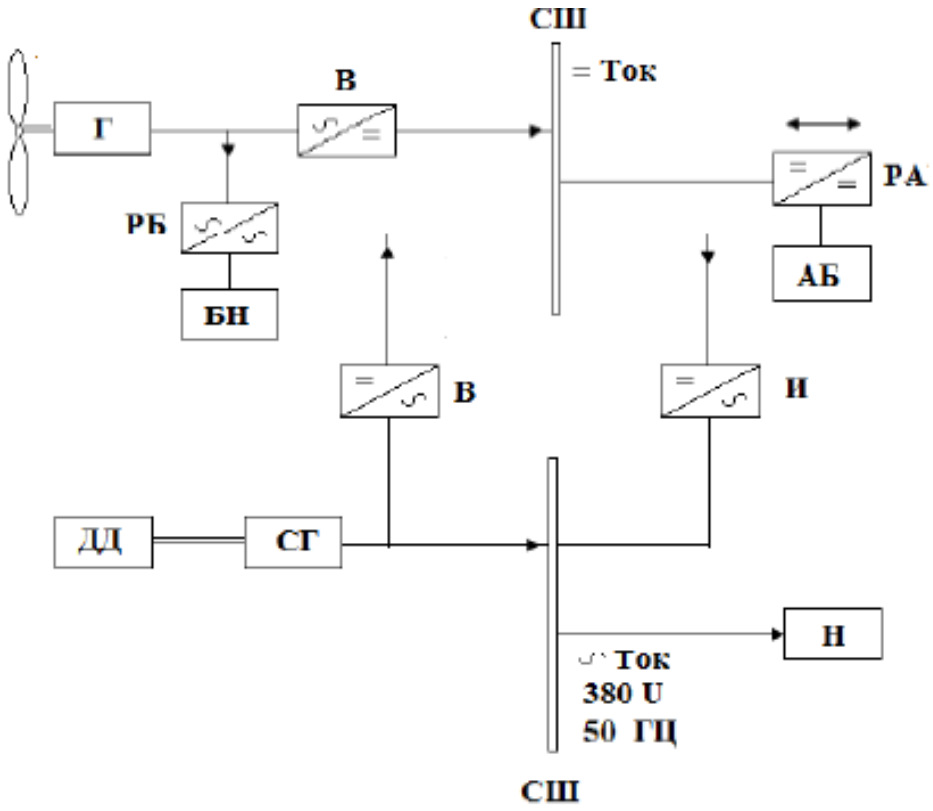


Рис. 36 Блочная схема ВДЭС с накопителем энергии

Для прогнозирования возможных режимов потребления электрической энергии от данной энергетической системой составим алгоритм (структура приведена на рисунке 37), в котором учтем характерные группы потребителей электрической энергии и их особенности.

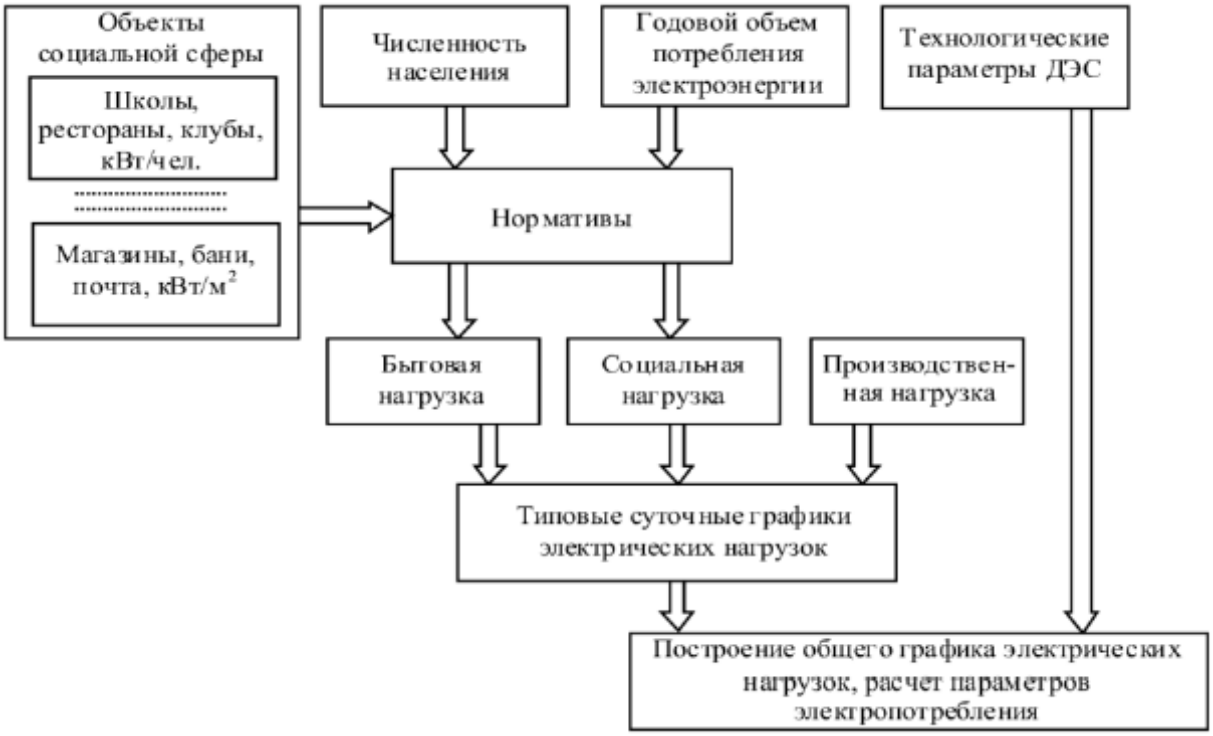


Рис. 37 Блок-схема расчета прогнозных режимов потребления электрической энергии автономной энергетической системой

Алгоритм выбора установки представлен на рисунке 38, где указаны все необходимые шаги, позволяющие квалифицированно принять решение.

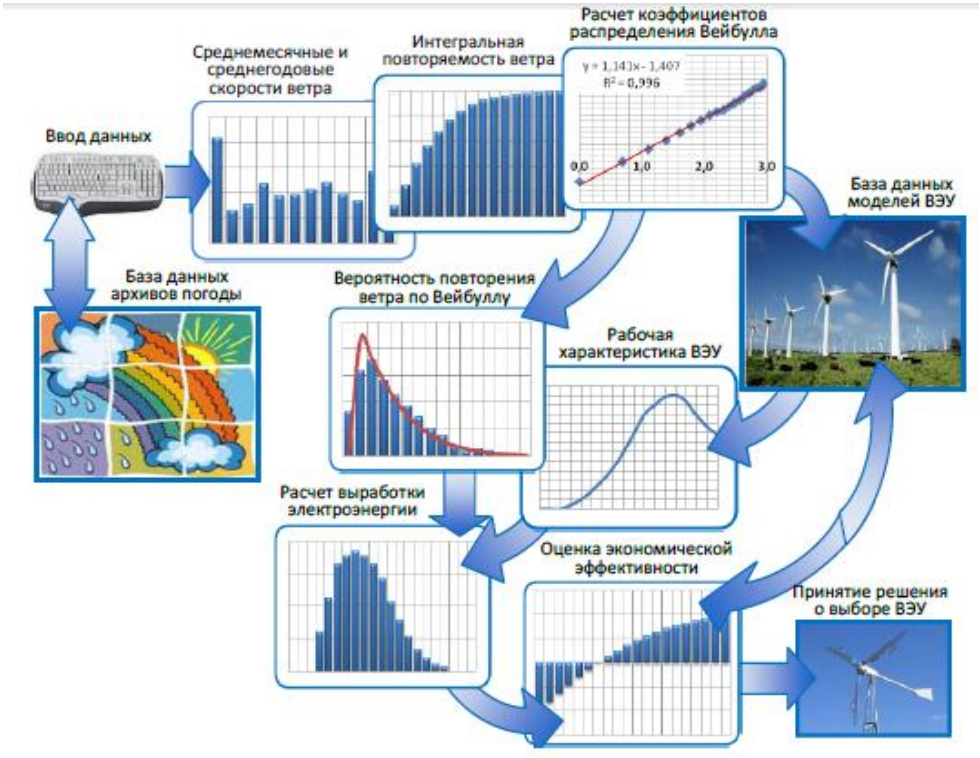


Рис.38 Алгоритм выбора ВЭС с накопителем энергии

Для выбора установки произведем следуюшие расчетные шаги.

С использованием функции распределения Вейбулла, получившую распространение в ветроэнергетике, определяем вероятность повторения ветра в любом интервале скоростей по выражению:

$$f(V)=\frac{dF(V)}{dV}=\frac{k}{c}\cdot\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1}\cdot e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^{k}}$$

где c – параметр масштаба, k – параметр формы, F(V) – функция интегральной повторяемости скорости ветра, которая характеризует долю времени (вероятности) того, что скорость ветра равна или ниже, чем V.

Затем определям среднегодовое количество энергии, вырабатываемое ВЭС, которое можно рассчитать по формуле:

$$W_{\text{ВЭУ}}=T\sum_{i=1}^{m}P_i(V)\cdot N_i(V),\quad \text{кВт}\cdot\text{ч}$$

где m – количество градаций скоростей ветра; T – общее число часов работы ВЭС в год; $P_i(V)$ – повторяемость скорости в данной градации; $N_i(V)$ – выходная мощность ВЭС в данной градации скорости ветра, кВт (определяется по рабочей характеристике ВЭС как среднее значение для данной градации).

Предлагаемая методика позволяет построить прогнозную модель продольной составляющей скорости ветра на каждый час, которую можно представить в виде:

$$\overline{V}_1=V_{\text{ср}}\pm\sigma,\quad \text{м/с}$$

где: – скорость ветра (по данным метеонаблюдений) в интервале 6 часов; V ср – среднеквадратичное отклонение, которое можно определить из эмпирического анализа распределения ветра Ван–дер–Ховена.

В качестве примера расчета на рисунке 39 приведен суточный режим работы ВДЭС, построенной на базе дизель-генератора номинальной мощностью 15 кВт, ВЭУ мощностью 50 кВт и буферного накопителя из 40 аккумуляторов с суммарной емкостью 90 кВт·ч.

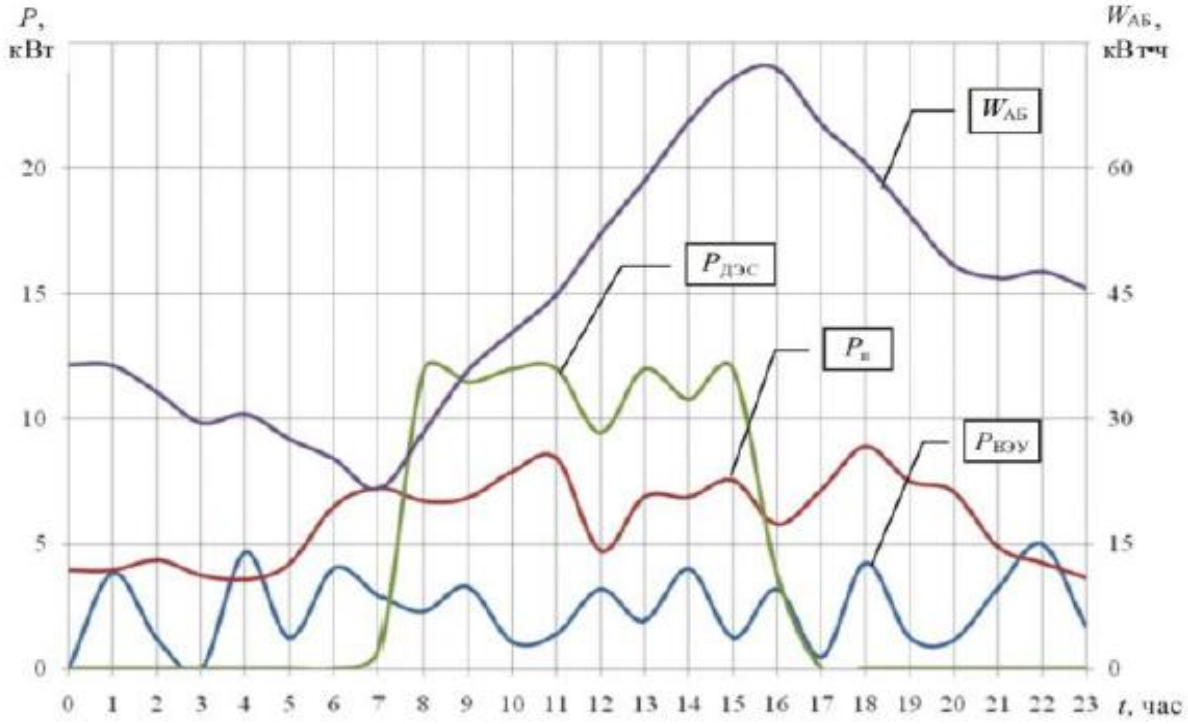


Рис. 39 Оптимизированный суточный рабочий режим ВДЭС с буферным накопителем энергии

Как и в рассмотренном выше алгоритме управления, силовые агрегаты ДЭС переводятся в рабочее состояние при снижении остаточной емкости аккумуляторных батарей ниже некоторого порогового значения (обычно не менее 30% от полной емкости) и остаются в работе до полного заряда аккумуляторов, после чего система управления формирует сигнал на отключение ДЭС.

В данном случае система управления во всех возможных рабочих режимах обеспечивает оптимальный режим заряда аккумуляторных батарей и неизменную загрузку дизель-генераторов на уровне 90% от их номинальной мощности. Обеспечение энергетического баланса между генерируемой и потребляемой мощностью во всех режимах работы ВДЭС осуществляется с помощью регулируемой балластной нагрузки.

В рамках выполнения работы предложена универсальная обобщенная схема ВДЭС и использован пакет прикладных программ, позволяющий моделировать рабочие режимы системы автономного электроснабжения с целью рационального выбора состава оборудования и определения эффективных алгоритмов управления.

Методика выбора оптимального варианта построения ВДЭС основана на расчете и сравнительном анализе энергетических характеристик автономной электростанции, предназначенной для электроснабжения конкретного потребителя с географической привязкой к месту ее размещения. Улучшение энергетических характеристик ВДЭС достигается за счет рационального выбора установленных мощностей генерирующих и

аккумулирующих источников, определяемых параметрами ветрового режима в месте размещения электростанции и характером электрической нагрузки потребителя, а также оптимального управления потоками энергии в замкнутой энергетической системе, которое обеспечивает единая система управления рабочими

На рис. 40 – 46 приведены структуры моделей, характеристики основных параметров и результаты расчетов, выраженные в виде осциллограмм динамических процессов для режимов увеличения нагрузки, требующих восстановления равномерности графиков нагрузки.

Моделирование проводилось в программном комплексе Simulink MatLab. В качестве моделей электроэнергетических систем, построенных с элементами ВИЭ и накопителями электрической энергии, приняты разработанные, прошедшие всестороннюю апробацию и рекомендованные для широкого применения элементы электроэнергетических систем. Параметры численного моделирования и математический метод были выбраны таким образом, чтобы обеспечить заданные условия точности (относительная ошибка расчетов при моделировании не превышала 10^{-6}), а выбранный метод решения – обеспечивал устойчивость математических вычислений.

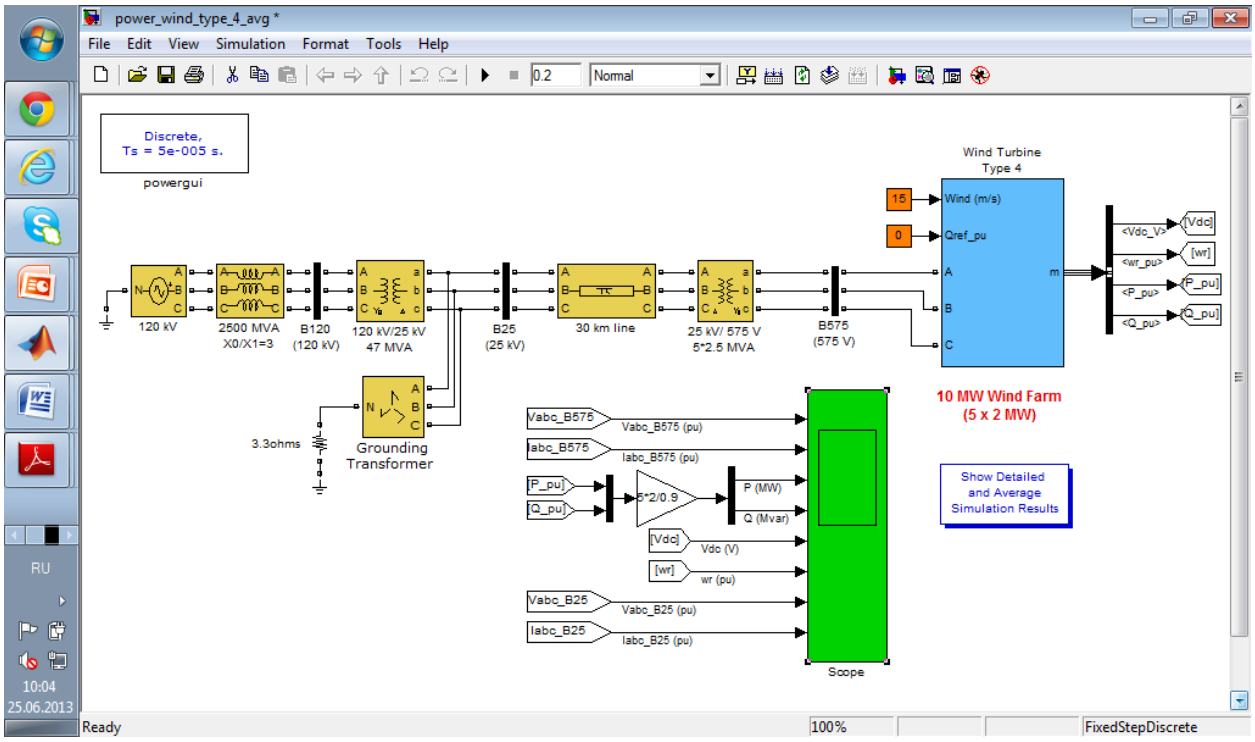


Рис. 40 Расчетная математическая модель в структуре Simulink для электроэнергетической системы с накопителем электрической энергии

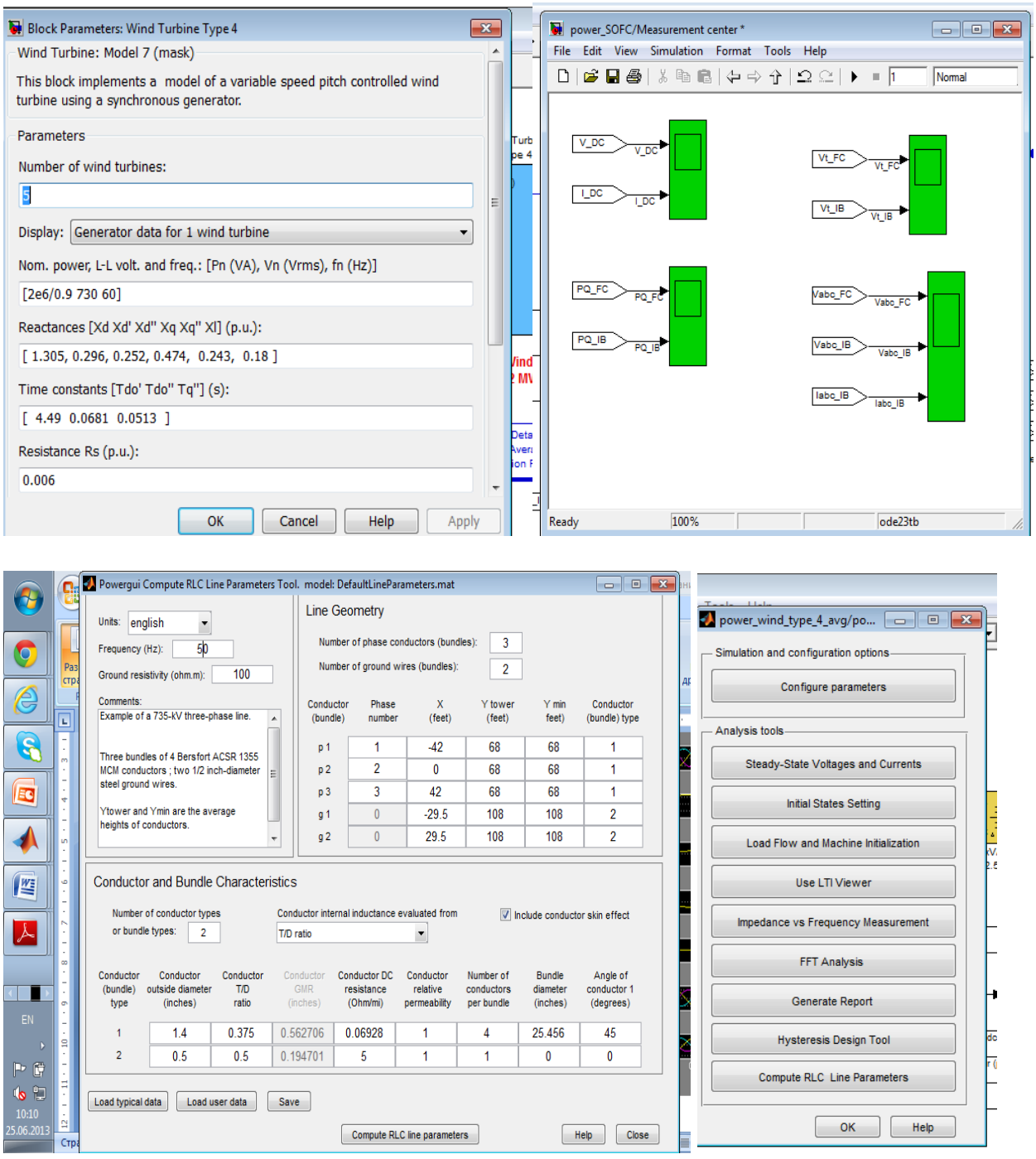


Рис. 41 Интерфейсы в структуре Simulink, позволяющие вносить изменения структуры и параметров математической модели для электроэнергетической системы с накопителем электрической энергии

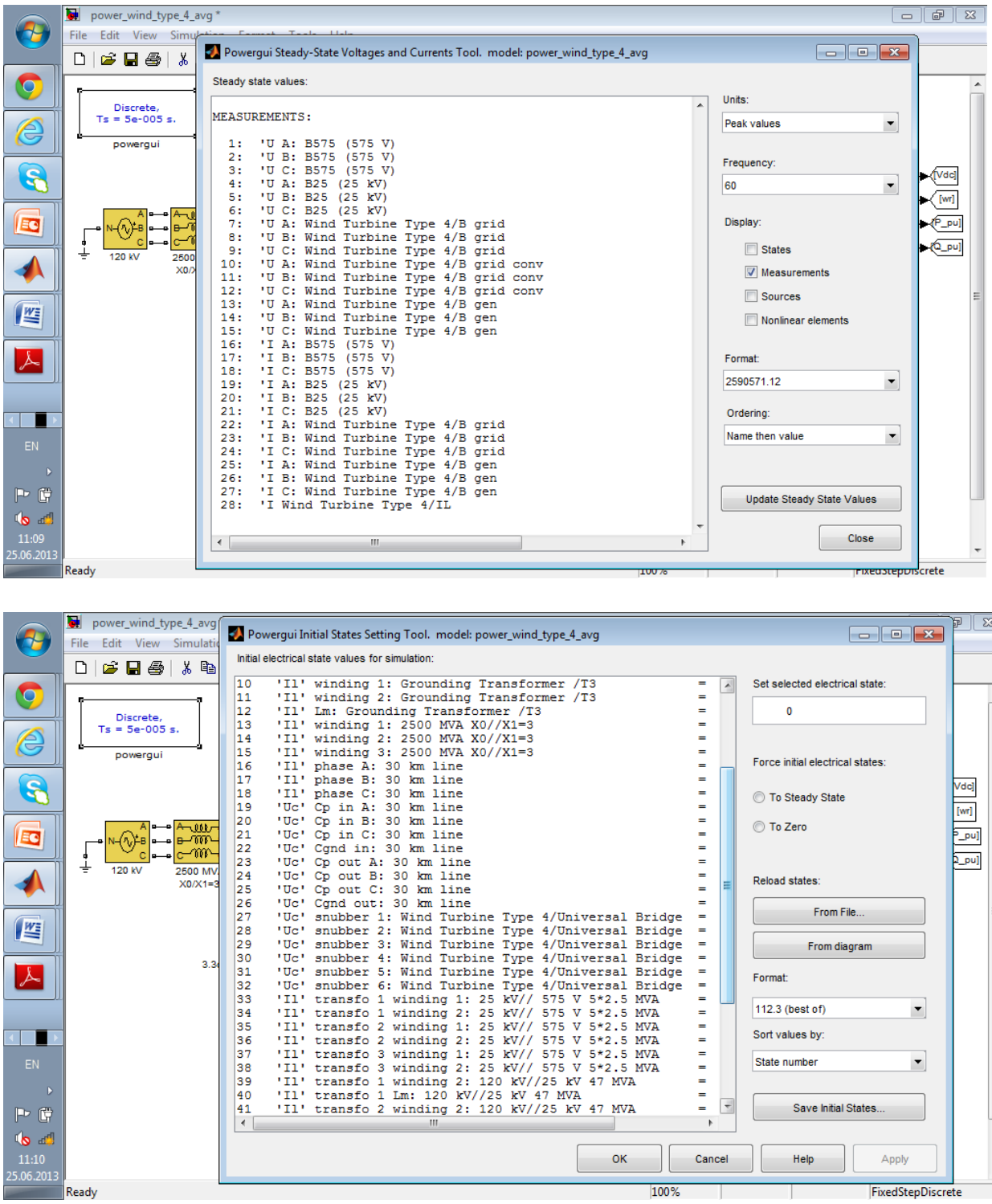


Рис. 42 Фрагменты подпрограмм в структуре Simulink, описывающие элементы структуры в процессе математического моделирования электроэнергетической системы с накопителем электрической энергии

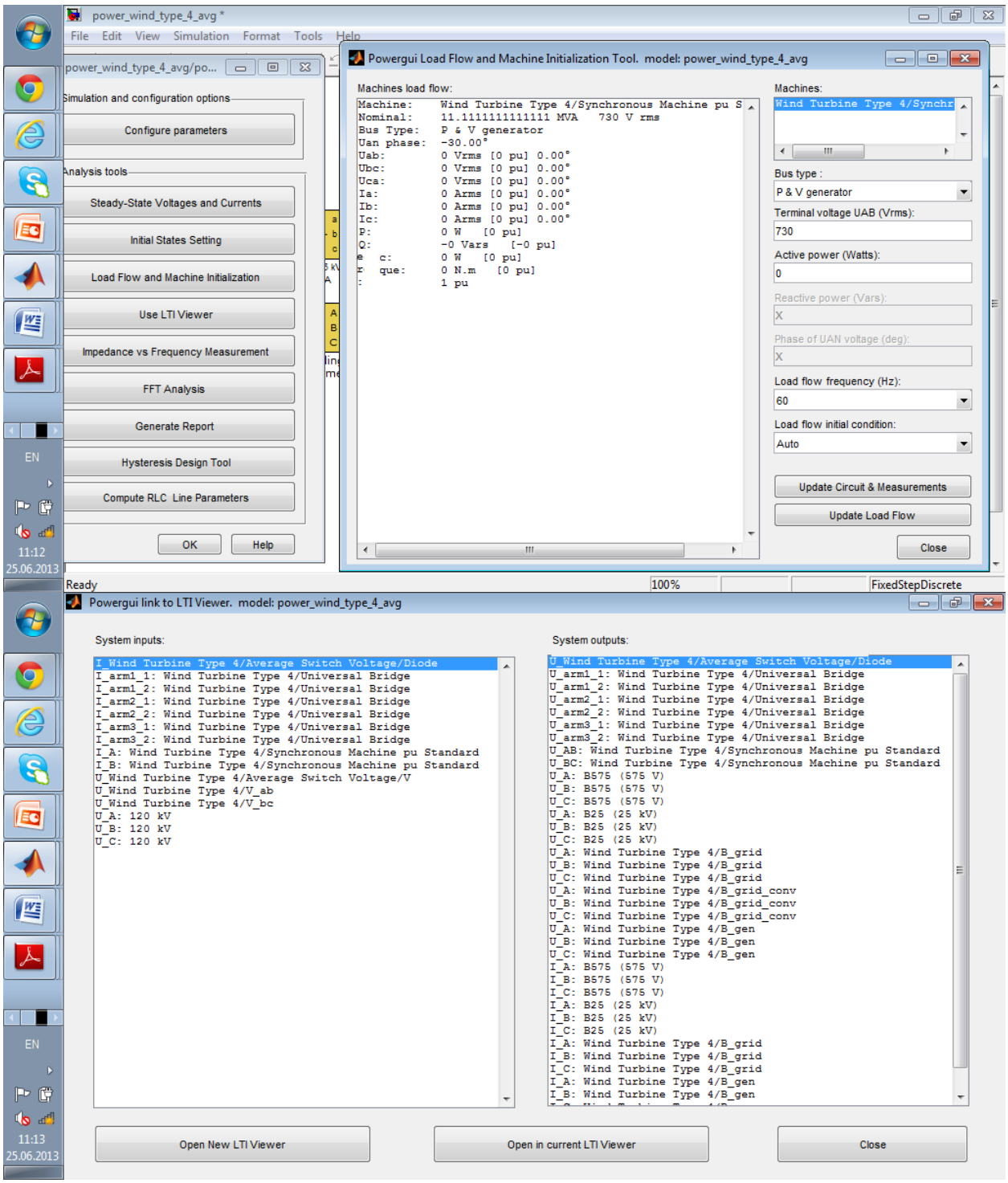


Рис. 43 Фрагменты подпрограмм в структуре Simulink, описывающие элементы структуры математической модели электроэнергетической системы с накопителем электрической энергии в процессе расчета динамических режимов и учета процесса «накопление-отдача» энергии

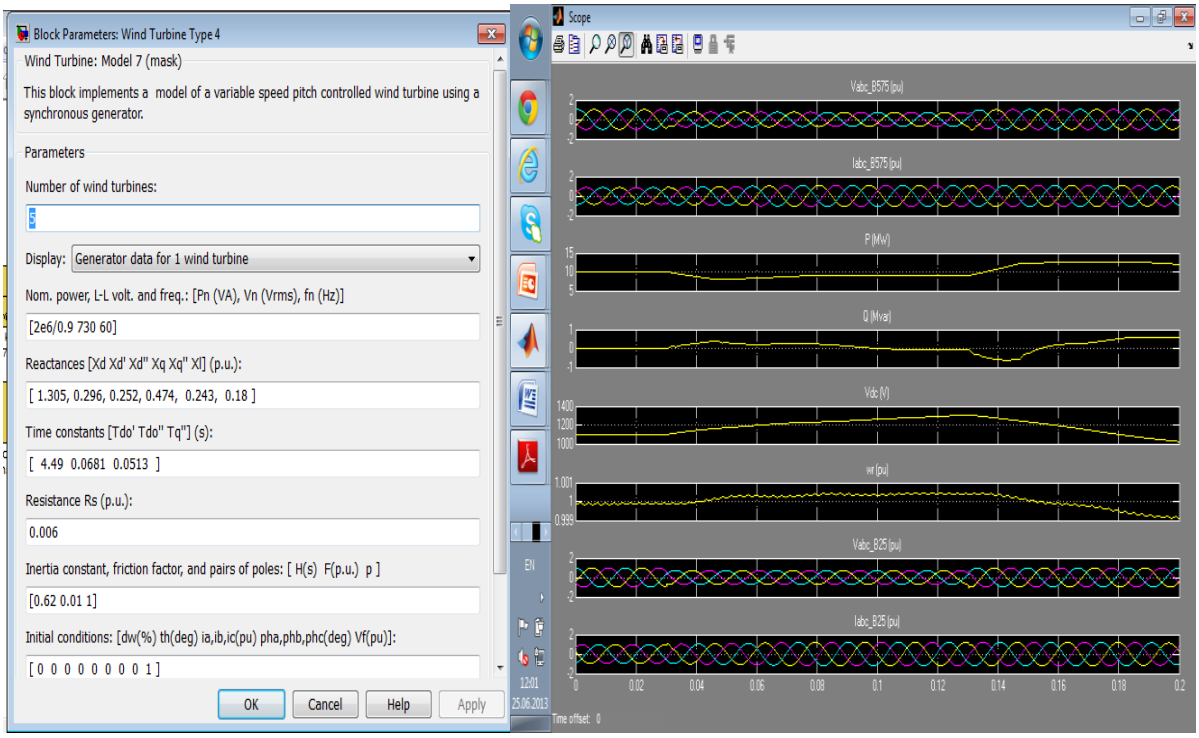


Рис. 44 Фрагменты исходных данных элементов электроэнергетической системы с накопителем электрической энергии и осциллограммы расчетов динамических режимов

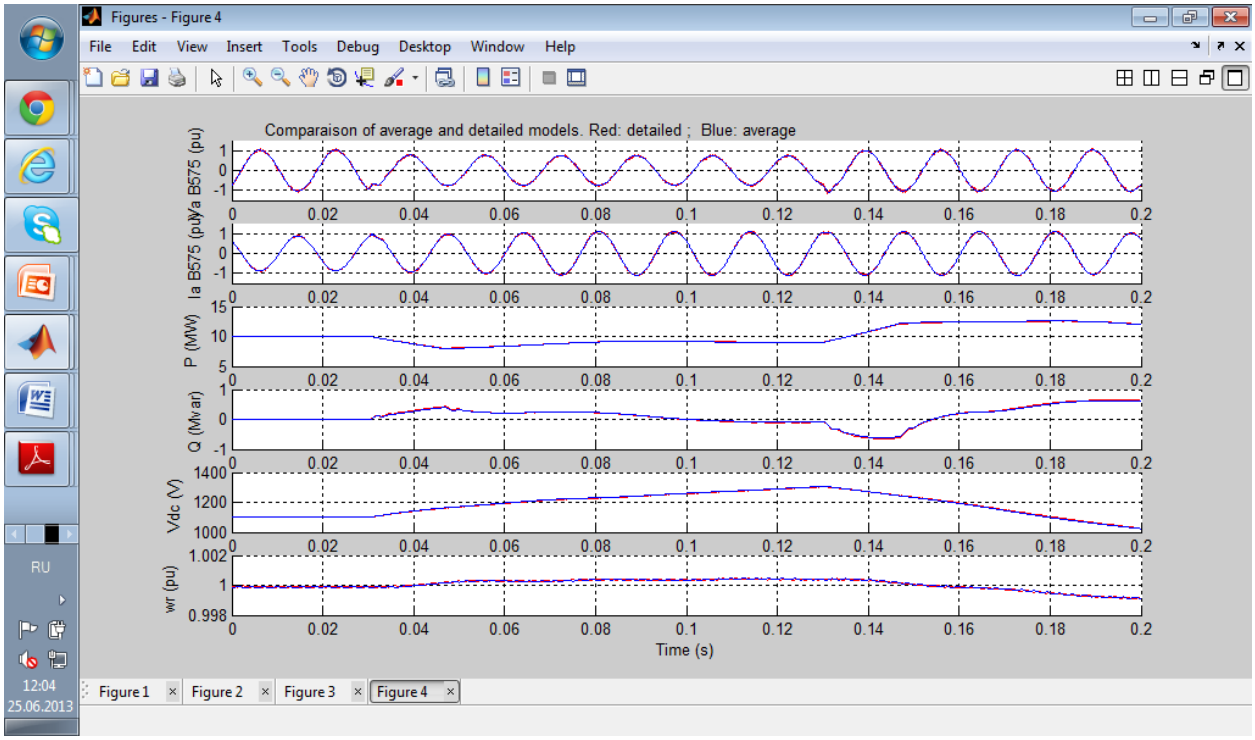
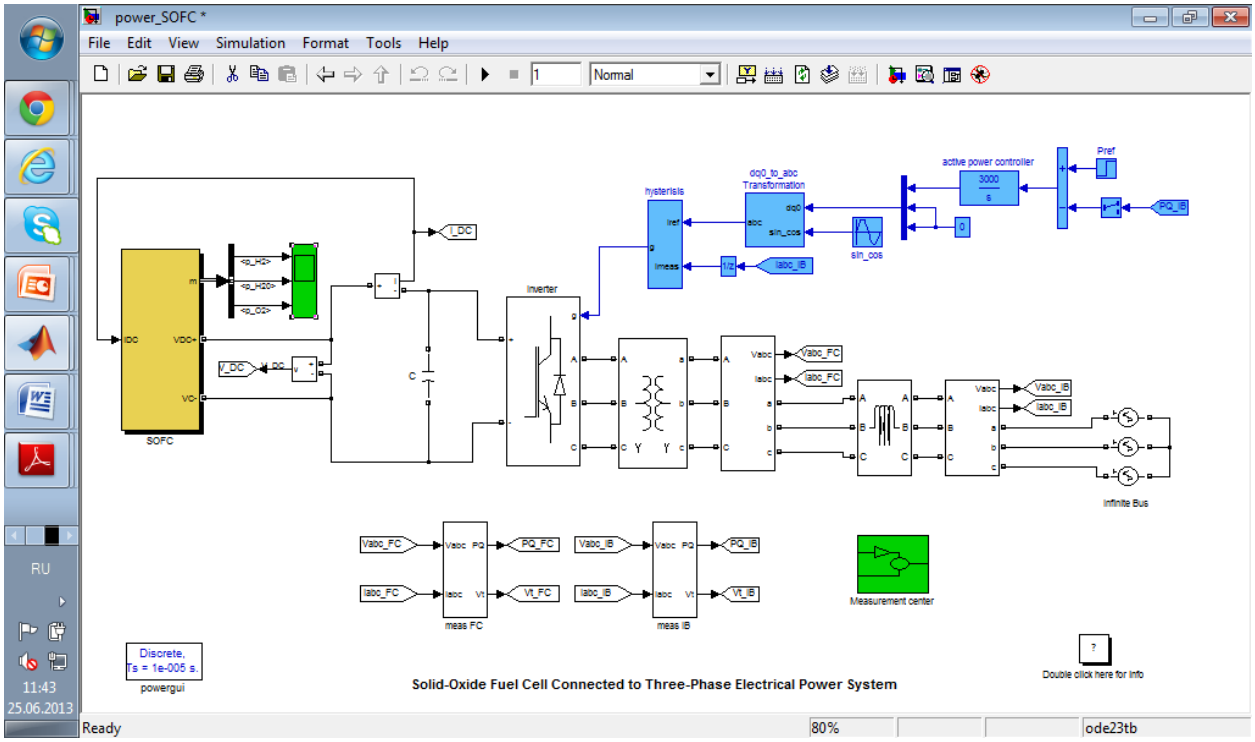


Рис. 44 Расчетные осциллограммы динамических режимов активной и реактивной мощности, напряжений и других выходных координат электроэнергетической системы с накопителем электрической энергии



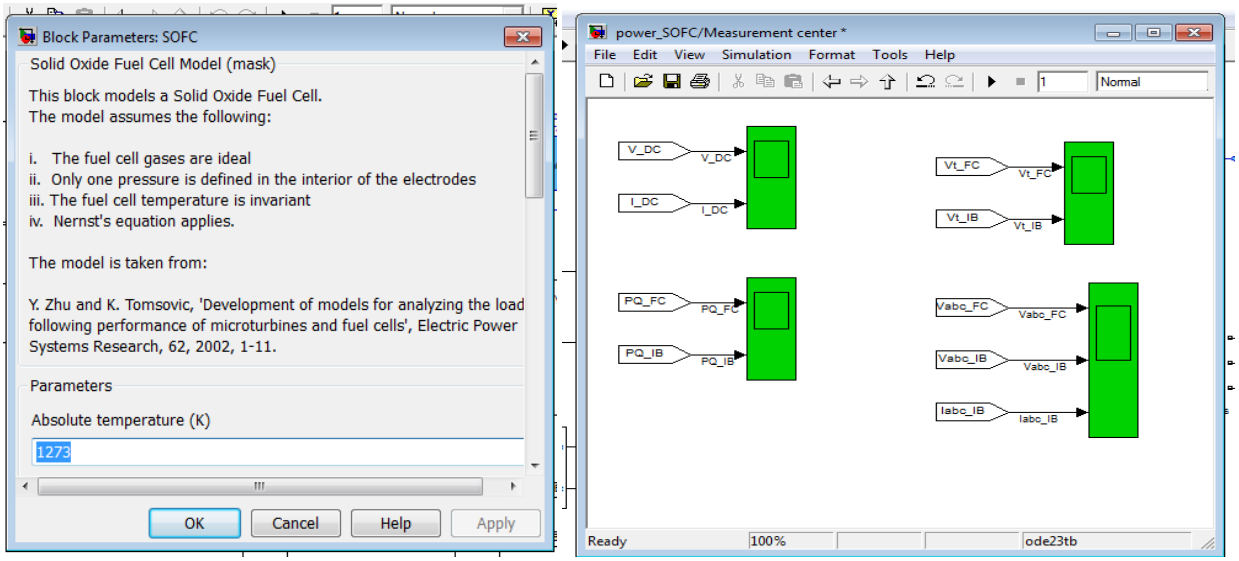


Рис. 45 Расчетная математическая модель в структуре Simulink, интерфейс и структура блока контроля выходных координат для электроэнергетической системы с накопителем электрической энергии, содержащим топливный элемент

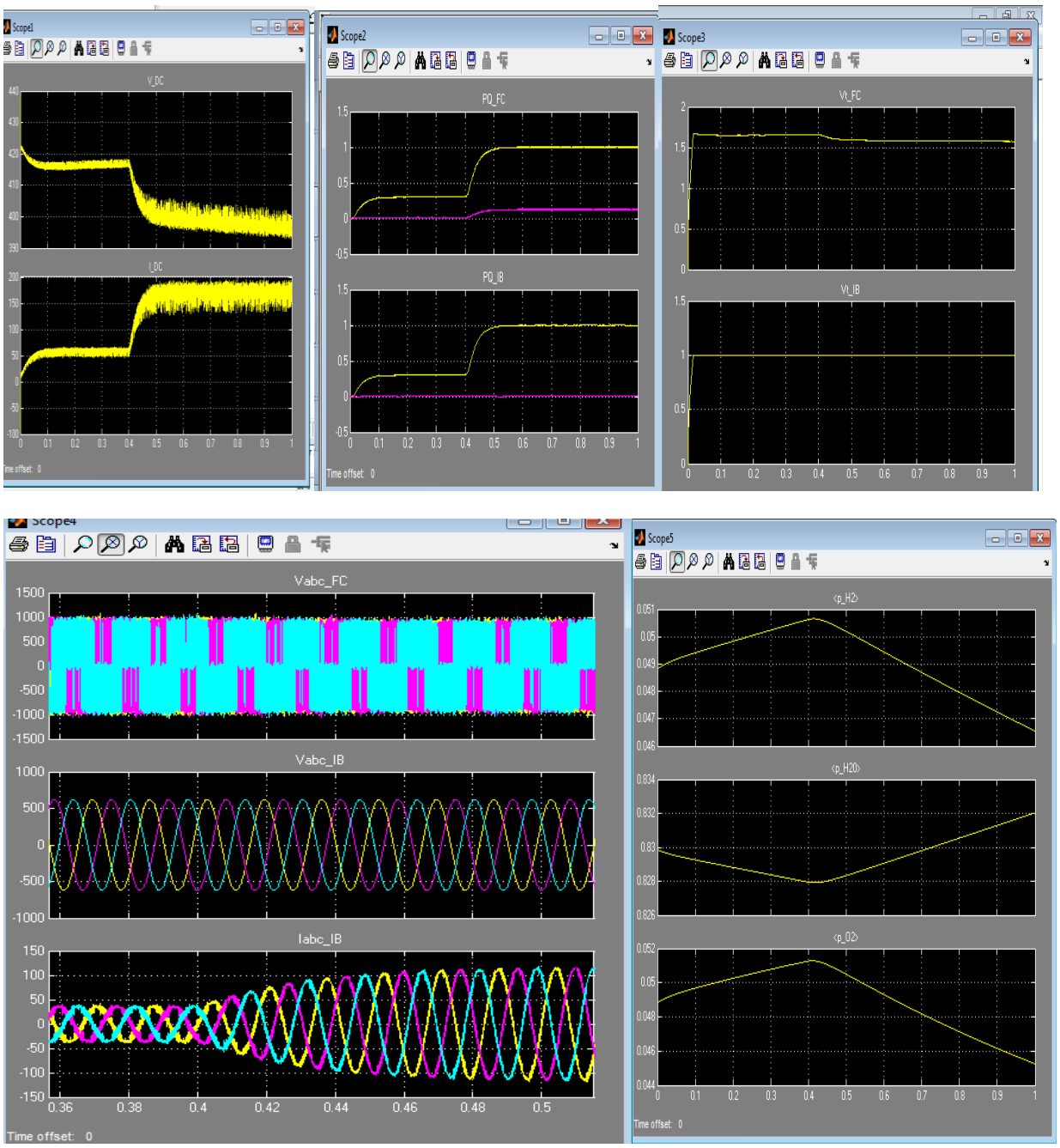


Рис. 46 Расчетные осциллограммы динамических режимов выходных координат электроэнергетической системы с накопителем электрической энергии, содержащим топливный элемент

Выводы:

1) Рассмотренные примеры практического применения накопителей энергии в различных отраслях, с учетом и характерных особенностей конструкции, условий эксплуатации и режимов работы дают все основания для их реального применения в электротехнических системах для развивающейся отрасли ВИЭ-электроэнергетики Республики Казахстан;

2) Могут быть рекомендованы приведенные в работе для пилотного применения с дальнейшим возможным развитием и научно-технической проработкой под индивидуальные условия: накопитель сетевой электроэнергии: аккумулятор от 1 МВт, сетевой накопитель электроэнергии 100 кВт; термодинамический накопитель энергии; накопитель энергии в устройстве стабилизированного питания для устройств электроэнергетики с ВИЭ, силовых электроподстанций и тяговых питающих подстанций электрифицированного транспорта.

Заключение

В диссертационной работе, исходя из анализа международного научно-технического и научно-технологического опыта в области исследований, создания и промышленного применения накопителей энергии для систем электрической генерации с использованием возобновляемых источников энергии, можно сделать следующее заключение:

1) Разработаны научно-обоснованные предложения по обеспечению сохранения и накопления энергетических ресурсов, являющихся инновационными научными, научно-техническими и научно-технологическими решениями, аккумулирующими опыт технологически развитых стран для применения в системах с возобновляемыми и нетрадиционными источниками энергии;

2) Разработаны научно-обоснованные предложения и технические реализации инновационных накопителей электрической энергии, которые создадут основу для дальнейшего развития прорывных технологий в области создания «интеллектуальной электроэнергетики» и энергоэффективных производств 21 века в Республике Казахстан.

3) Рекомендовано создавать сетевые накопители электрической энергии гигаваттных мощностей на основе модульных структур аккумуляторных накопителей большой мощности.

4) Сетевые накопители электрической энергии рекомендовано рассматривать как ключевой элемент современной электроэнергетической сети.

4) Рекомендовано устанавливать накопители в местах, определяемых только требованиями электрической сети, что позволяет наиболее эффективно использовать их как для решения ряда системных задач, так и для стабилизации графиков выдачи мощности ВИЭ.

5) Рекомендовано применение накопителей электрической энергии для применения в перспективных ВИЭ-системах, инновационных интеллектуальных электрических сетях и «виртуальных» электростанциях нового поколения на территории Республики Казахстан только после соответствующего технико-экономического обоснования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yergin D. Energy security in the 1990s // Foreign Affairs, vol. 67, no. 1, Fall 1988. p. 111.
2. Leiby. P. Summary of Discussion in Workshop: Security, Economic and Environmental 8. Yergin D. Energy security in the 1990s // Foreign Affairs, vol. 67, no. 1, Fall 1988. p. 111.
3. Сайт: http://www.electrosad.ru/SpLit.htm
4. Ю.Н.Елдышев. **Проблема хранения энергии.** http://rutracker.org/forum/viewtopic.php?t=3099579
5. Тугузова Т.Ф., Доклад на I Международном Конгрессе Energy Fresh 2009, Москва, 23-24 сентября 2009 г..
6. J.P. Deane et al. / Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 1293–1302.
7. Jami Hossain, A case study of high wind penetration in the Tamil Nadu Electricity Utility, ENERGY POLICY August 1993, p. 868-874.
8. H. Lund, G. Salgi, The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems / Energy Conversion and Management 50 (2009) 1172–1179.
9. Greenblatt JB, Succar S, Denkenberger DC, Williams RH, Socolow RH. Baseload wind energy: modeling the competition between gas turbines and compressed air energy storage for supplemental generation. Energy Policy 2007;35:1474–92.
10. Madlener R, Latz J. Economics of centralized and decentralized compressed air energy storage for enhanced grid integration of wind power. Appl Energy (2011), doi:10.1016/j.apenergy.2011.09.033.
11. Каменев Ю.Б. Оценка перспективности свинцово-кислотных аккумуляторов. Сборник научн. Трудов по свинцовым аккумуляторам ЗАО «Электротяга»., С.-Пб., Химиздат, 2005, с. 13-62.
12. Хрусталёв Д. А. Аккумуляторы. М: Изумруд, 2003.
13. David Linden, Thomas B. Reddy (ed). Handbook Of Batteries 3rd Edition. McGraw-Hill, New York, 2002 ISBN 0-07-135978-8 chapter 35.
14. Rydh C.J., Sanden B.A. Energy Conversion and Mamagement 46 (2005) 1957-1979.
15. "How to rebuild a Li-Ion battery pack". Electronics-lab.com. http://www.electronicslab. com/articles/Li_Ion_reconstruct/. Retrieved 8 October, 2009.
16. А.Рыкованов, Системы баланса литий-ионных батарей// Силовая электроника, 1 (2009), С. 52-55.
17. Taku Oshima, Masaharu Kajita, Akiyasu Okuno "Development of Sodium-Sulfur Batteries" International Journal of Applied Ceramic Technology Volume 1, Pages 269-276, 2004. doi:10.1111/j.1744-7402.2004.tb00179.
18. Коровин Н.В. Топливные элементы. М., Химия, 1998.

19. Андреев В.М., Забродский А.Г., Когновицкий С.О., Интегрированная энергоустановка с накопителем энергии на основе водородного цикла, Международный журнал «Альтернативная энергетика и экология» АЭЭ №2 (46), 2007,99-105.
20. Malyshenko S. P., Gryaznov A. N., Filatov N. I.: «High-pressure H2/O2-steam generators and their possible applications», Int. Journ. Hydrogen Energy,V.29. P.589—596, 2004.
21. Алюмоводородная энергетика. Под редакцией акад. РАН А.Е. Шейндлина. М, ОИВТ РАН, 2007 г.
22. Тарасенко А.Б., Школьников Е.И., Водородный цикл и другие способы буферного аккумулирования электроэнергии для энергоустановок на солнечных батареях: сравнительный технико-экономический анализ, Тезисы докладов Второй Международной конференции «Технологии хранения водорода», г. Москва, 28-29 октября 2009 г., с. 43-44.
23. В.Б.Аваков и др., Академия Энергетики, № 4 (24), август 2008, с. 28-33.
24. К.Г.Большаков и др., Альтернативная энергетика и экология, № 4 (24), 2005 г., с. 52-57.
25. Ch. Fabjan, J. Garche, B. Harrer, L. Jorissen, C. Kolbeck, F.Philippi, G. Tomazic, F.Wagner, The vanadium redox-battery: an efficient storage unit for photovoltaic systems//Electrochimica Acta 47 (2001) 825–831.
26. F. Rahman, M. Skyllas-Kazacos, Vanadium Redox Battery: Positive Half-Cell Electrolyte Studies, Journal of Power Sources (2008).
27. Vanadium Redox Flow Batteries: An In-Depth Analysis. EPRI, Palo Alto, CA: 2007. 1014836.
28. Martha Schreiber, Adam H. Whitehead, Martin Harrer, VANADIUM REDOX FLOW BATTERY IMPROVED TECHNOLOGY// ENVIETECH31.1. –1.2.2008 Wien.
29. Ю.М.Вольфкович, Т.М.Сердюк, Электрохимическая энергетика, 2001, Т.1 №4., с.14-28.
30. К.К.Деньщиков, Оптимизация взаимодействия наноструктурированных углеродных материалов и электролитов на основе ионных жидкостей для повышения электроэнергетических характеристик суперконденсаторов, Труды Международного форума по нанотехнологиям, (Роснанофорум), Москва, 2008.
31. A. Burke, Ultracapacitor Technologies and Application in Hybrid and Electric Vechicles, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2009.
32. Abhiman Hande, Todd Polk, William Walker, Dinesh Bhati, Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes//Microprocessors and Microsystems 31 (2007) 420–432.
33. Bottling Electricity: Storage as a Strategic Tool for Managing Variability and Capacity Concerns in the Modern Grid, EAC Report December 2008, см.:http://www.oe.energy.gov/eac.htm.

34. Abhiman Hande, Todd Polk, William Walker, Dinesh Bhati, Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes//Microprocessors and Microsystems 31 (2007) 420–432;
35 Сайт:http://www.mobilegtes.ru/novosti/interview/interview-single/p/1/item/45/138/?type=98&cHash=6011216448. Интеллектуальные сети: проблема аккумулирования энергии.
36 Пресс-релиз компании «Русский сверхпроводник» от 23 июля 2010 г.
37 Журнал «Энергорынок» [1], № 12 (83) 2010.
38 М.П. Бычкова, Накопители электрической энергии, «Инженерный центр, http://ganzfeld.narod.ru/energ/nopitel.
39 Сайт: http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=185
40 Э.ААзизов, И.А.Иванов, А.П.Лотоцкий. Каскадные системы с индуктивными накопителями Электричество, 1990, N4, с. 25-31
41 А.П. Лотоцкий. О перспективах использования индуктивных накопителей энергии для питания мощных магнитных систем. Препринт ИАЭ-3714, ИАЭ, -М., 1982, -20с.
42 А.П. Лотоцкий. Об эффективности передачи магнитной энергии из индуктивных накопителей. Электричество, 1985, N 6 с.64
43 А.П. Лотоцкий, И.А. Иванов. Изобретение "Индуктивный накопитель". А.С. N 10229402, Б.И. 1983 N26
44 Э.А.Азизов, А.П.Лотоцкий. Структура и оптимальные параметры секционированных индуктивных накопителей для импульсного питания больших магнитов. Электричество, 1990,ЫЗ, с.25-31
45 А.П.Лотоцкий. Индуктивные накопители энергии. Учебное пособие для студентов МИФИ. ГК РФ по высшему образованию, МИФИ, 1992, -50с.
46 A.P.Lototsky, A.Lebedev, N.Grabchak, M.Krylov. Research of railgun with distributive input of energy from magnetic storages. 5-th Europ. Symposium on EML technology, Toulouse, April 10-13, Proc. Conf. Report N 82
47 Л.П.Побережский. Об индуктивных накопителях энергии. Труды МЭИ, вып.45, 1963
48 Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat http://www.dissercat.com/content/fizicheskie-mekhanizmy-pri-vyvode-magnitnoi-energii-iz-induktivnykh-nakopitelei-v-moshchnykh#ixzz2VSIAfxPk
49 MATLAB. Описание, www.sl-matlab.ru.
50 Основы работы в Curve Fitting Toolbox, www.matlab.exponenta.ru
51 Функции Curve Fitting Toolbox, www.matlab.exponenta.ru
52 Statistics Toolbox 5.0. Руководство пользователя, www.matlab.exponenta.ru
53 «Глобальная энергоэкологическая стратегия устойчивого развития в 21 веке», Назарбаев Н.А., 2011г.
54 Сайт: http://www.ntc-power.ru/innovative_projects/ drives_a_large_electric power energy/ Накопители электрической энергии большой емкости.

55 Сайт: http://www.powerinfo.ru/supercapacitor.php Ионистор.
56 Сайт: http://grepen.com.ua/articles/istochniki-energii/gibridnyj-nakopitel-elektricheskoj-energii/
57 Сайт: http://www.smartgrid.su/2012/02/14/obzor-akkumulyatornykh-nakopitelejj/
58 Сайт: http://khd2.narod.ru/gratis/accumul.htm
59 Сайт: http://wiki.energyinsight.ru/wiki/%D0%9D%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D0%B8 Накопители электроэнергии.
60 Накопители электрической энергии http://ganzfeld.narod.ru/energ/nakopitel.htm
61 Сайт: http://www.smartgrid.su/2012/02/14/obzor-akkumulyatornykh-nakopitelejj/
62 Сайт: http://greenenergetika.ru/setevye-nakopiteli-akkumulyatory-ot-1-mvt Накопители (Аккумуляторы от 1 мВт).
63 Сайт: http://www.cnrg.ru/about/presscenter/promotional%20material/SHELF-Thermodynamic-energy-storage.pdf Термодинамический накопитель электроэнергии как альтернатива ГАЭС.
64 Сайт: http://grepen.com.ua/articles/istochniki-energii/gibridnyj-nakopitel-elektricheskoj-energii/ Гибридный накопитель электрической энергии.
65 Сайт: http://www.ultracapacitors.org/index.php?option=com_content&Itemid=64&id=29&task=view
66 Сайт: http://www.electrosad.ru/Electronics/SuperCon.htm
67 Сайт: http://supercap.ru/superkondensatori.htm Суперконденсатор.
68 Сайт: http://www.gstu.by/sites/default/files/files/science/08907.pdf, Г.О. Широков, Устройство поддержания стабилизированного питания электроприемника.
69 Патент РФ 2254659, МПК H 02J 9/06, 2005.
70 Патент РФ 109344, МПК H 02J 9/06, 2011.
71 Сайт: http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi/Tezi_EES_%20pdf/444.PDF, А.А.Сулим, Емкостной накопитель в системе динамического нагружения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
72 Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
73 Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. Накопители энергии: Учеб. пособие для вузов. Под ред. Д.А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
74 3.Пантегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – Киев: Наук. думка, 1982. – 424 с.

75 4. Родькин Д.И., Корнет В.Н., Мосьпан В.А., Величко Т.В. К теории электропривода с емкостным накопителем // Труды КДПУ, 2000, Вып. 2. – С. 149-151.
76 5.Родькин Д.И., Величко Т.В. Особенности осуществления электропривода с накопителями энергии // Труды КДПУ, 2000, Вып. 2. – С. 124-132.
77 Драчев Г.Г. Аккумуляторы подвижного состава. – М.: Транспорт, 1970.
78 Дасоян М.А., Новодережкин В.В., Томашевский Ф.Ф. Производство электрических аккумуляторов. – М.: Высшая школа, 1970.
79 Иванова Е.А., Бельков В.М. Эксплуатация и утилизация никель-кадмиевых аккумуляторов //Вестник ВНИИЖТ. – 2011. – № 2. – С. 32–34.
80 Попель О.С., Тарасенко А.Б. Накопители электрической энергии // Энергоэксперт. 2011. №3. С. 28-37.
81 Goodman, Marty. Lead-Acid or NiCd Batteries? // Harris Cyclery. Retrieved 2009-02-18.
82 Хрусталев Д.А. Аккумуляторы. // М.: ООО «Изумруд». 2003.
83 Jami Hossain. A case study of high wind penetration in the Tamil Nadu Electricity Utility // ENERGY POLICY. 1993. August. p. 868-874.
84 Шакарян Ю.Г. и др. Перспективы применения накопителей энергии в ЕНЭС и ЕЭС России // Вести в электроэнергетике.2010. №4. С. 16-22.
85 Сайт: http://www.freepatent.ru/patents/2259284
86 Ю.М.Бей, Р.Р.Мамошин и др. Тяговые подстанции./Учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: Транспорт, 1986 - 319 с.
87 Применение батарейного накопителя на горной железной дороге. Железные дороги мира. - 1998, №3, с.37-40.
88 Выравнивание нагрузки тяговых подстанций с помощью аккумуляторов энергии. Железные дороги мира. - 1997, №1, с.43-50.
89 Сайт: http://www.iea.org Международное энергетическое агентство Информация по вопросам эффективного использования энергии, возобновляемой энергетики и др.
90 Сайт: http://www.caddet.org Аналитический Центр Распространения Демонстрационных Энергетических Технологий (CADDET).
91 Сайт: http://www.eceee.org The European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE).
92 Сайт: http://www.thecarbontrust.co.uk/energy The Energy Efficiency Best Practice programme (EEBPP).
93 Сайт: http://www.ef.org Energy Foundation.
94 Сайт: http://www.nwalliance.org Northwest Energy Efficiency Alliance.
95 Сайт: http://www.tellus.org Tellus Institute is a nonprofit research and consulting.
96 Сайт: http://www.gcrio.org U.S. Global Change Research Information Office GCRIO.
97 Сайт: http://hes.lbl.gov Home Energy Saver Designed.

98 Сайт: http://oee.nrcan.gc.ca/oee_e.cf Office of Energy Efficiency, Natural Resources Canada.
99 Сайт: http://www.ase.org The Alliance to Save Energy.
100 Сайт: http://www.energystar.gov ENERGY STAR.
101 Сайт: http://www.aeecenter.org Association of Energy Engineers.
102 Сайт: http://www.home)performance.org Provides services which increase the comfort, health and safety, efficiency and durability of housing through the treatment of the house as a whole system.
103 Сайт: http://aceee.org/index.htm American Council for an Energy Efficient Economy (ACEEE).
104 Сайт: http://www.appro.org/links.html Renewable Energy and Sustainable Energy.
105 Сайт: http://www.sustenergy.org/tpl/page.cfm?pagID=27#r1 Intelligent energy.
106 Сайт: http://www.sustenergy.org/tpl/page.cfm?pageName=intelligent _ energylinks. Intelligent energy.
107 Сайт: http://www.nd.gov/dcs Practical Energy Saving Tools Energy Conservation and Renewable Energy Programs.