

---

# Применение накопителей в энергосистеме для целей противоаварийной автоматики

**Глускин Игорь Захарович**

д.т.н., профессор

**Ефремов Дмитрий Геннадьевич**

аспирант

**Ефремова Ирина Юрьевна**

аспирант

Кафедра РЗиАЭ НИУ МЭИ

Одним из способов повышения экономической эффективности современных энергосистем является укрупнение их номинальных параметров, которое позволяет снизить затраты на сооружение и эксплуатацию энергетических объектов. Однако этот процесс сопровождается выделением в энергосистеме характерных узлов – генерирующих и нагрузочных. В связи с этим возникают вопросы устойчивости электропередач переменного тока между крупными энергообъединениями. Решение указанных проблем возлагается на систему противоаварийной автоматики.

Для предотвращения нарушения устойчивости в энергосистеме автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) выбирает и реализует различные управляющие воздействия. Традиционными управляющими воздействиями АПНУ являются следующие:

- разгрузка турбин (РТ);
- отключение генераторов (ОГ);
- отключение нагрузки (ОН).

Разгрузка турбин – это управляющее воздействие противоаварийной автоматики, предназначенное для компенсации энергии, запасенной ротором генератора за время короткого замыкания (импульсная разгрузка) и для обеспечения нормативного запаса по статической устойчивости в послеаварийном режиме (длительная разгрузка). Недостатками данного метода являются сложность расчета импульса и возможность потери устойчивости на втором цикле качаний, а также переторможение генератора. Это связано с тем, что из-за задержки начала разгрузки и ограниченной ее скорости приходится увеличивать глубину разгрузки. Кроме того, объемы РТ и применение РТ ограничены опасностью понижения частоты в системе. Также важно учесть, что РТ отправной энергосистемы, работающей на приемную энергосистему несоизмеримо меньшей мощности, совершенно не эффективна.

Отключение генератора – это управляющее воздействие противоаварийной автоматики, предназначенное для предотвращения нарушения устойчивости в энергосистеме. Данное управляющее воздействие имеет ряд недостатков. ОГ, увеличивая сопротивление генераторов отправной части, увеличивает взаимное сопротивление в послеаварийном режиме, уменьшая тем самым предел передаваемой мощности по сечению. Кроме того, отключение генератора ведет к уменьшению выдаваемой реактивной мощности, что также снижает предел электропередачи. Таким образом, эффективность ОГ нельзя всегда считать гарантированной. В разных условиях она различна. Она тем больше, чем легче отправная система, чем лучше в ней регуляторы возбуждения, чем ближе нагрузка в отправной системе подключена к генераторам. Эффективность отключения каждого следующего генератора меньше, чем предыдущего. Нельзя не отметить, что частые отключения вредны для оборудования и сокращают срок его эксплуатации.

---

Отключение нагрузки – это управляющее воздействие противоаварийной автоматики, предназначенное для предотвращения нарушения устойчивости в энергосистеме. Главным недостатком данного управляющего воздействия является его экономическая неэффективность. Кроме того, данное управляющее воздействие эффективно только в приемной системе несоизмеримо малой мощности по сравнению с отправной системой. Он лишь в редких случаях может рассматриваться как средство сохранения динамической устойчивости. Это вызвано тем, что при первом нарастании взаимного угла может потребоваться настолько значительный объем ОН, что возникает нарушение устойчивости при обратном уменьшении угла и ускорении приемной системы, получившей избыток мощности. [1,2,3].

Для оптимизации противоаварийного управления в настоящее время целесообразно использовать устройства FACTS, в том числе накопители энергии: сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии (СПИНЭ), аккумуляторные батареи большой мощности (АББМ), молекулярные конденсаторы, маховиковые накопители. С помощью данных управляющих воздействий появляется возможность предотвращения нарушения устойчивости в энергосистеме без нарушения электроснабжения потребителя и без снижения пропускной способности сети.

Сверхпроводниковый индуктивный накопитель состоит из нескольких (или одной) индуктивных катушек, которые выполняются из сверхпроводникового материала, и имеют систему криообеспечения (охлаждения) и защиту от перехода в нормальную фазу, обратимого тиристорного преобразователя, обеспечивающего связь накопителя с сетью, и фильтрокомпенсирующего устройства, необходимого для подавления высших гармоник, вырабатываемых тиристорным преобразователем.

Применение СПИН в электроэнергетических системах способствует повышению устойчивости, маневренности и надежной работы, что подтверждает повышенный интерес к разработке и исследованию данного вида накопителей в разных странах.

В Германии в Мюнхенском техническом университете с 1992 г. проводились экспериментальные исследования работы СПИН при различных способах его применения. Для этого был разработан пилотный проект СПИН энергоемкостью порядка 1,4 МДж.

В Испании с 1993 г. проводятся эксперименты по различным схемам тиристорных преобразователей, оценке тепловых потерь, а также режимам работы СПИН в энергосистеме. Для этих целей осуществлялся проект АМАС 500 по созданию СПИН энергоемкостью 1 МДж с максимально выдаваемой мощностью 500 кВт. В рамках данного проекта был создан экспериментальный СПИН энергоемкостью 25 кДж с максимально выдаваемой мощностью 50 кВт.

В Японии с 1988 г. ведутся разработки применения сверхпроводимости в электроэнергетических системах. При этом уделяется большое внимание не только созданию СПИН, но и различным способам их применения. Известен проект подключения СПИН к обмотке возбуждения генератора, что способствует уменьшению энергии и мощности накопителя при демпфировании колебаний ротора генератора. Исследуется влияние места подключения СПИН и законов управления им на демпфирование низкочастотных колебаний в энергосистеме.

Совместная разработка фирмы «Babcock&Wilcox» и Анкориджской энергокомпании «Municipal Light and Power» накопителя энергоемкостью 1800 МДж с максимально выдаваемой мощностью 40 МВт является самым крупным из реализованных в рамках применения в электроэнергетической системе проектов СПИН. Указанный накопитель предназначен для поддержания нормального уровня частоты, регулирования напряжения, регулирования выдачи мощности генератора, демпфирования колебаний по высоковольтной линии.

Большое внимание было уделено накопителям, позволяющим быстро изменять распределение

мощности. Эти накопители характеризует меньшее количество запасаемой энергии. В 1983 г. в Лос-Аламосской лаборатории был создан накопитель энергоемкостью 30 МДж с максимально выдаваемой мощностью 10 МВт. Он был установлен на подстанции Такома для демпфирования колебаний частотой 0,35 Гц.

В России проводятся работы в области применения СПИН в электроэнергетике, и в части проектирования самих накопителей, и в части исследования влияния накопителей на устойчивость энергосистем и улучшения экономических показателей их работы [6,7].

Технические характеристики перспективных СПИН (Ростовский государственный университет путей сообщения) приведены в таблице 1.1:

Таблица 1.1. Технические характеристики СПИН.

Энергоемкость	кВт*ч (МДж)	1000(3600)
Максимальная мощность	МВт	300
Число секторов тороида	штук	48
Внешний диаметр обмотки	м	6
Высота обмотки	м	6
Диаметр криостата	м	7.5
Высота криостата	м	10
«Холодная» масса обмотки	т	250

В течение долгого времени механические накопители энергии (на основе маховика) не находили широкого применения. Это было связано с не очень высокими показателями эффективности их работы. Но за последние десятилетия благодаря внедрению новых технологий ситуация изменилась, и сейчас они находят широкое применение в различных областях, в том числе и в энергетике.

Механический накопитель на основе маховика, совмещенный с электрической машиной, работающей и в режиме двигателя, и в режиме генератора (электромеханический накопитель) способен как запасать и хранить механическую энергию, так и преобразовывать и выдавать ее в виде электрической энергии для последующего использования. Запасается кинетическая энергия вращательного движения маховика, который при заряде электромеханического накопителя раскручивается. При разряде запасенная механическая энергия преобразуется в электрическую с помощью электродвигателя, который начинает работать в режиме генератора.

Исследования устройств механического накопителя совмещенного с электрической машиной, начались с конца 70-х годов двадцатого века. За это время появились сверхпрочные и легкие материалы, улучшились характеристики постоянных магнитов, магнитных подшипников, электроники. Это привело к тому, что современные механические накопители обладают большой энергоемкостью и способны более быстро отдавать запасенную энергию. Эти преимущества позволяют внедрять электромеханические накопители в различные устройства.

Исследования, проведенные в Ливерморской лаборатории, выявили, что современные электромеханические накопители энергии обладают существенным преимуществом над другими видами систем аккумулирования в эффективности восстановления энергии (кВтч на разряд по отношению кВтч на заряд). КПД в них выше 95%, это значительно выше, чем у любой свинцово-

---

кислотной батареи. Удельная запасенная энергия при этом может достигать 5-10 кВт, что в несколько десятков раз выше, чем у электрохимических батарей.

Основными преимуществами механических накопителей, использующих в своей конструкции маховик, являются:

- высокая удельная плотность запасенной энергии;
- высокая удельная мощность;
- отсутствие влияния циклов заряда-разряда на срок эксплуатации, длительный срок эксплуатации махового колеса;
- масштабируемость;
- не требуется периодическое обслуживание;
- низкое воздействие на окружающую среду.

В настоящее время уже существуют коммерческие применения механических накопителей энергии в различных областях, таких как космические технологии, транспорт, источники бесперебойного питания (UPS), системы повышения качества электрической сети, системы автономного электроснабжения. [10]. Создание маховика с выдачей мощности 1 МВт в течение 15 мин. позволит использовать его при пуске газовых турбин, стабилизации напряжения и частоты в сети.

В России был разработан эскизный проект маховикового накопителя на основе асинхронизированной машины вертикального исполнения мощностью 200 МВт.(презентация ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»,2012).

Супермаховик - один из типов маховика, накопитель механической энергии. Изобретён в 1964 году советским инженером Н. В. Гулиа. Современный супермаховик представляет собой барабан, изготовленный из композитных материалов, например, намотанный из тонких витков стальной, пластичной ленты, стекловолкна или углеродных композитов. За счёт этого обеспечивается высокая прочность на разрыв. Для уменьшения потерь на трение супермаховик помещается в вакуумированный кожух. Зачастую используется магнитный подвес. За счёт конструктивных особенностей способен хранить до 500 ватт\*часов (1.8 МДж) на килограмм веса.

Суперконденсатор представляет собой импульсное электрохимическое устройство, предназначенное для компенсации быстрых переходных процессов в различных электрических схемах. От аккумуляторов различных типов он отличается существенно меньшей энергоёмкостью (единицы Вт\*ч/кг) и повышенной удельной мощностью (2–10 кВт/кг). Процесс запасания энергии в суперконденсаторах осуществляется за счёт разделения заряда на двух электродах с достаточно большой разностью потенциалов между ними.

Так как химических превращений веществ в процессе работы суперконденсатора не происходит (если не допускать превышения зарядных напряжений), ресурс системы достаточно велик и может превышать 100 000 циклов заряда-разряда. Учитывая вышеупомянутые особенности суперконденсаторов, целесообразно их использование в гибридных схемах с аккумуляторами. В этом случае суперконденсатор реагирует на короткие пики генерации или потребления электроэнергии, увеличивая ресурс аккумулятора и снижая время отклика всей системы на внешние воздействия. В отличие от аккумуляторных батарей суперконденсаторы не требуют ухода, они безопасны для окружающей среды, имеют широкие пределы рабочих температур и очень высокую удельную плотность по мощности.

Суперконденсаторы относятся к разряду накопителей короткого времени и конкурируют с маховиками и СПИН, однако более компактны и просты: маховики дают 630 Вт на 1 дм<sup>3</sup>

занимаемого пространства, а суперконденсатор — 2000 Вт на 1 дм<sup>3</sup>. (ЭЛЕКТРО 2/2005)

Технология суперконденсаторов может найти широкое применение в приборостроении, энергетике (например, одним из распространенных применений является использование в ветряных турбинах, где суперконденсаторы помогают сгладить прерывистое питание от ветра), автомобилестроении, машиностроении, электротехника (в электрических и гибридных транспортных средствах для питания электропривода), также эффективно использование в качестве питания мобильных телефонов, и др.

Возможные применения суперконденсаторов в энергосистеме и требуемые при этом их параметры приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Параметры суперконденсаторов, используемых в энергетике.

Функции накопителя	Мощность	Энергия
Демпфирование колебаний мощности в системе (разряд менее 5 с) при 500 МДж	100 МВт	500 МДж
Поддержка при перерывах питания до старта резервного дизеля	20-100 МВт	300-1500 МДж
Регулирование частоты в системе (поглощение или выдача энергии)	100-1000 МВт	0,4-40 МДж
Регулирование напряжения в сети через инвертер по схеме источника напряжения (до 15 мин).	1Мвар	-

Аккумуляторная Батарея Большой Мощности - накопитель, который состоит из мощных литий-иттриевых батарей объединенных в пакеты. Предназначение АББМ достаточно широкое. Литий-иттриевая батарея имеет очень небольшой саморазряд, что очень выгодно отличает ее от свинцово-кислотных или никель-кадмиевых / никель-металл - гидридных батарей, которым необходима периодическая подзарядка.

Системе состоящей из пакетов литий-иттриевых батарей, необходим разовый номинальный заряд и далее система хранит полученную энергию до 12 месяцев практически без тока саморазряда ( $\leq 3\%$  в год). Заряжать АББМ можно как от внешних сетей, так и от альтернативных источников (солнечной энергии или ветрогенераторов).

Стационарная или передвижная АББМ установленная в энергосистеме может сглаживать пиковые нагрузки, балансировать энергосистему, так же может обезопасить от аварийных отключений системы.

АББМ может изготавливаться как стационарного типа, так и мобильного на шасси грузового автомобиля предназначенного аварийным или иным службам, номинальная мощность таких устройств: 100KW , 1000KW и 5000KW;

Особо актуально применение: оборонными предприятиями, службами МЧС и ГО при бедствиях и чрезвычайных ситуациях на объектах социальной значимости: больницы, аэропорты, вокзалы, стадионы.

Применение АББМ на объектах в системах энергоснабжения крупных городов:

- Запуск электростанции «с нуля» после ее внезапного выхода из работы из-за аварии в сети (остановка турбин).
- Снятие перегрузок распределительной сети при прохождении максимумов нагрузки.

- 
- В производствах, весьма чувствительных не только к длительным нарушениям электроснабжения, но и к кратковременным.
  - Для предотвращения лавины напряжения в районах с большим сосредоточением синхронной двигательной нагрузки.

Известен проект ФСК по поставке двух сетевых накопителей на ПС 220кВ «Псоу» (г. Сочи) и «Волхов-Северная» (г. Санкт-Петербург) компанией ENER1 мощностью 1500 кВт, разработчики ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» и другие. В рамках разработки технологий данного направления будут определены новые бизнес модели и возможные области оказания услуг накопления энергии. (презентация ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2012).

Технология литий-иттриевой батареи достаточно безопасна и надежна, имеет мировые сертификаты соответствия требованиям безопасности.

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 (аккумуляторная батарея большой мощности – от 1 мВт до 6 мВт – возможно и более) - это принципиально новый этап в развитии энергетических систем.

К настоящему моменту проведено значительное количество работ по исследованию накопителей различного вида.

В работе [4] представлен универсальный алгоритм управления электромеханическим накопителем в составе автономной энергосистемы с резко-переменным характером нагрузки.

Анализ работы данных энергосистем показал, что значительным резервом, позволяющим кардинально улучшить технико-экономические характеристики, является стабилизация графика нагрузки на среднем уровне при использовании в их составе накопителей энергии. Сравнительный анализ показал, что одним из наиболее перспективных типов накопителей, отвечающим необходимым требованиям для автономных энергосистем, является электромеханический накопитель энергии.

В работе [5] исследована возможность использования электрохимических конденсаторов в составе энергетической установки автономного транспортного средства для повышения эффективности функционирования систем тягового электропривода.

В работе [6]:

1. разработаны новые методы определения энергетических и технических характеристик СПИН, обеспечивающих выполнение требуемых задач управления с учетом возможности направленного регулирования активной мощности накопителя.
2. Разработаны новые методы определения требуемых объемов управляющих воздействий на изменение активной мощности СПИН, обеспечивающих сохранение устойчивости ЭЭС в динамических режимах.
3. Разработаны новые алгоритмы расчета энергоемкости СПИН.
4. Разработаны новые алгоритмы расчета технических характеристик СПИН, базирующиеся на представлении его магнитной системы в виде соленоидальной конструкции.

В работе [7] разработаны математические модели известных видов накопителей электрической энергии для анализа установившихся режимов и электромеханических переходных процессов. Синтезированы законы управления СПИНЭ на основе принципа максимума Понтрягина для решения задач увеличения пределов динамической устойчивости и демпфирования колебаний

---

ЭЭС. Получен и испытан закон управления СПИНЭ.

В работе [8] Проведен анализ сверхпроводниковых накопителей энергии (СПИН) как управляемых элементов энергосистем. Показаны их достоинства в повышении ресурса управления в энергосистемах и в демпфировании низкочастотных колебаний. Проведено комплексное моделирование сверхпроводниковых управляемых индуктивных накопителей энергии в составе электродинамической модели энергосистем, определены условия управляемости СПИН и предложены методы защиты от потери управляемости СПИН. Разработаны алгоритмы, обеспечивающие независимое управление активной и реактивной мощностью СПИН, предложены схемы связи СПИН с энергосистемой. Исследовано воздействие СПИН на устойчивость ЭЭС.

В работе [9] обоснован алгоритм выбора параметров системы накопителей электроэнергии, включающий разработанную методику упрощенного анализа их эффективности, позволяющую с заданной точностью обеспечить необходимую степень выравнивания нагрузки.

Из изложенного выше следует, что в настоящее время для целей сохранения устойчивости энергетических систем рассматривается в основном только СПИН, что значительно сужает круг возможных реализаций. Использование СПИН позволяет временно повысить устойчивость динамического перехода системы, но, в связи с небольшой энергоемкостью не позволяет полноценно контролировать запас устойчивости при электромеханических переходных процессах.

Вывод:

В данной статье рассмотрены накопители энергии различных видов, приведены их особенности и технические характеристики, проведен анализ работ в области исследования накопителей энергии. В результате исследования было выявлено, что в настоящее время в существующих и перспективных работах не рассматривается применение накопителей энергии для целей противоаварийной автоматики за исключением СПИНЭ. Также не рассматривается вопрос о возможности применения сочетания накопителей электроэнергии для достижения максимального эффекта при реализации управляющих воздействий от устройств противоаварийной автоматики, не разработаны алгоритмы управления группой накопителей в условиях нарушения статической и динамической устойчивости. Иными словами, не исследованы области эффективности использования для ПА накопителей разных систем с учетом их преимуществ и ограничений. Таким образом, разработка оптимального способа управления группой накопителей энергии для повышения эффективности противоаварийного управления в энергосистеме позволит качественно улучшить как динамическую, так и статическую устойчивость многомашинной энергосистемы в аварийном и послеаварийном режиме и является важной и актуальной задачей.

Литература

1. Глушкин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. I - М.: «Знак». 2009.
2. Глушкин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. II - М.: «Знак». 2011.
3. Иофьев Б.И. Функционирование противоаварийной автоматики // Вопросы противоаварийной автоматики электроэнергетических систем. Сб. научных трудов ин-та «Энерго-сетьпроект». М.: Энергоиздат. 1982.
4. Мосиенко А. Б. Разработка алгоритма и системы автоматического управления электромеханического накопителя для автономных энергосистем: Дисс...канд. техн. наук. Новосибирск, 2004 – 191 с.
5. Аносов В.Н. Методы и средства повышения эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств: Дисс...докт. техн. наук. Новосибирск, 2009 – 252 с.

- 
6. Масалев Д.Ю. Исследование и разработка методов выбора характеристик сверхпроводникового индуктивного накопителя в системе противоаварийного управления электроэнергетических систем: Дисс...канд. техн. наук. М., 2000 – 137 с.
  7. Кузнецов О.Н. Разработка алгоритмического и методического комплекса исследований динамической устойчивости электроэнергетических систем со статическими накопителями электроэнергии: Дисс...канд. техн. наук. М., 2003 – 193 с.
  8. Новиков Н.Л. Повышение режимной надежности и управляемости объединённых энергосистем с помощью новых средств и систем управления: Дисс...докт. техн. наук. Новосибирск, 2001 – 503 с.
  9. Брагин А.А. Алгоритм формирования графиков электрических нагрузок предприятия с применением аккумуляторных батарей в качестве потребителей-регуляторов мощности: Дисс...канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2013 – 130 с.
  10. Сайт о возобновляемой энергетике [Интернет-портал]. URL: <http://renewable.com.ua> (дата обращения: 22.01.2015).