

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем

(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Применение сетевых накопителей электрической энергии в системах  
электроснабжения

Обучающийся

Н.В. Фролов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

д.т.н., доцент А.А. Кувшинов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

## Содержание

Введение.....	3
1. Анализ состояния проблемы применения накопителей энергии различного вида с целью противоаварийного управления. Аргументация и создание целей, а также вопросов изучения.....	7
1.1. Отдельные утверждения об обеспечении динамической устойчивости в конкретных условиях.....	12
1.2. Существующие методы и средства обеспечения устойчивости.....	15
1.3. Устранение противоаварийных возмущений системы при помощи накопителей.....	18
2 Реализация аккумуляторной системы накопления энергии.....	24
2.1 Функция и интеграция СНЭЭ в энергосистему.....	25
2.1.1 СНЭЭ как предмет сглаживания резких изменений мощности... ..	26
2.2 Пропускная способность распределительных сетей с применением систем накопления электрической энергии.....	31
2.3 Коммерческое хранение аккумуляторов .....	35
2.4 Расширенный инструмент анализа данных «А4».....	41
2.5 Основные неисправности литий - ионных аккумуляторов и их причина.....	44
3 Конфигурация системы и системы управления маховика.....	50
3.1 Основы системы хранения маховика.....	54
3.2 Характеристики маховика.....	59
3.2.1 Применение маховиков.....	60
3.3 Анализ потока мощности жилых фотоэлектрических систем с маховиками.....	66
3.3.1 Стратегия работы системы.....	67
Заключение.....	71
Список используемых источников.....	72

## Введение

Нынешние технологии накопления электроэнергии существенно упрощают установку возобновляемых источников энергии в большом количестве, при помощи которых появляется возможность обеспечением электроэнергией, в то время, когда возобновляемые источники по каким-то причинам не могут этого сделать.

Известно, что энергия ветра производится только когда дует ветер, а солнечная собственно, когда светит солнце, что в итоге немного не согласуется с спросом и предложением в период низкой активности. Исходя из выше перечисленного, получение электричества планируется заранее и составляются определенные часы.

При новых технологиях хранения электроэнергии появляется возможность получения энергии в низкие пики, а также продавать излишки в пиковые периоды. При использовании электроэнергии от возобновляемых источников, которая хранится в накопителях, существенно сокращает выбросы в атмосферу парниковых газов. Более существенно уменьшить парниковые газы будет возможно благодаря использованию смеси электроэнергии, используемой для зарядки технологии хранения, будет очень низкоуглеродной.

Так же хранение может существенно отложить крупно затратные инвестиции в новую ветвь генерации энергии и ее передачу, повышая при этом надежность и стабильность. Помимо этого, с хранением энергии появляется такая возможность как обеспечение электроэнергией вспомогательные нужды или услуги необходимые для надежности и стабильности электросети. Хранение поможет избежать кризиса в периоды аномальных погодных условий, в ходе которых возникает опасность повреждения линий электропередачи или иных опасных ситуаций.

При хранении энергии различают несколько методов, таких как длительное хранение энергии и быстро высвобождаемой. Некоторые

технологические методы больше заточены под обеспечение коротких всплесков электроэнергии для приложений, которые обеспечивают качество электроэнергии, к примеру, сглаживание выработки возобновляемых источников энергии от часа к часу. Так же оборудование выйдет из строя если поток электроэнергии вдруг станет резким и неплавным.

Возобновляемая электроэнергия или другая доступная продукция могут храниться в периоды низкого спроса и высвобождаться в периоды более высокого спроса.

Ниже виден график показывающий зависимость выравнивания нагрузки или снижение пиковой нагрузки, относится к использованию электроэнергии, хранящейся в периоды низкого спроса, для удовлетворения пикового спроса на электроэнергию в тот же день, но чуть позже.

Однодневный профиль нагрузки системы [5] хранения электроэнергии (рисунок 1):

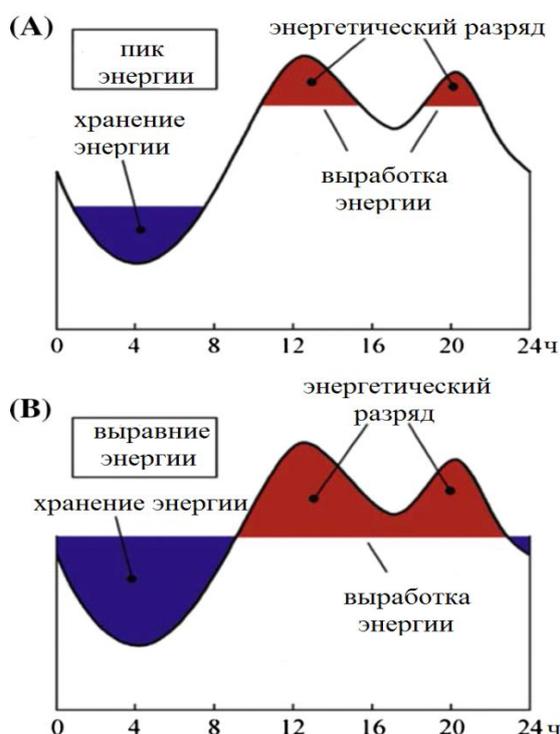


Рисунок 1 - Однодневный профиль нагрузки системы хранения электроэнергии [5]

## Актуальность выбранной темы

Актуальность данной темы заключается в том, что современные направления развития электроэнергетических систем зачастую связаны с обширным внедрением новейших технологий, особенно генерации при помощи возобновляемых источников энергии, таких как солнечные панели, ветрогенераторы и т.д., автоматизированные системы управлением переменным током, благодаря чему появляется возможность вводить в эксплуатацию новые генерирующие мощности и способность снизить напряженность в экологической среде от электроэнергетики. В тот же момент возможность внедрения новых систем зачастую требует пристального изучения и наблюдения как поведет себя система в работе с алгоритмами систем автоматического управления (САУ). Более опасным возмущением, приводящим к нарушению динамической устойчивости, является короткое замыкание.

Новейшие накопители электроэнергии выделяются самым главным параметром таким, как способность к мгновенному изменению потребления или отдачи мощности. Таким образом при использовании систем с накопителями появляется существенное увеличение электродинамической стойкости.

Применение и разработка современных накопителей электроэнергии для повышения эффективности противоаварийных управлений при серьёзных возмущениях в современных энергосистемах, является особо важной и актуальной задачей, как настоящего, так и будущего времени.

## Цель работы

Целью данной работы является использования накопителей энергии разнообразного типа для противоаварийного управления при существенных возмущениях в энергосистеме.

## Объект исследования

Объектом данного исследования выступают накопители электроэнергии различных типов.

## Задачи работы

- Рассмотрение состояния вопроса использования накопителей энергии разнообразного типа для противоаварийного управления. Аргументирование и построение целей и задач исследования.

- Потенциал при использовании накопителей энергии разнообразного типа дабы повысить динамическую стабильность генератора при больших возмущениях.

- Возможность использования маховиковых накопителей ради увеличения эффективности противоаварийного управления при существенных возмущениях в энергосистеме.

## **1 Анализ состояния проблемы применения накопителей энергии различного вида с целью противоаварийного управления. Аргументация и создание целей, а также вопросов изучения**

«Глубокое формирование атомной энергетики потребует определенных действий с генерации, а также электросетевого хозяйства, которые гарантируют урегулирование силы в энергосистеме» [21]. В ближайшие десять лет покрытие неустойчивой области графика электронагрузок в единичных энергосистемах станет невозможно в отсутствие роли ядерных электростанций (атомная электростанция).

Самая частая проблема, которая встречается это мало манёвренность или сниженный отклик оборудования, проблема может решиться довольно просто за счет применения СНЭ, такой синтез сможет выдавать энергию на пиках когда есть ощутимая нехватка, а также обладает аккумулярованием энергии при низком спаде нагрузок, помимо всего этого появляется еще один довольно ощутимый плюс он заключается в том, что появляется возможность компенсации реактивной мощности с возможностью регулирования частоты, весь этот комплекс со СНЭ возможно применить наряду с генерирующими объектами. За счет достигнутых эффектов режим работы АЭС, а также ее эксплуатация будет проходить в номинальном режиме работы.

В иностранном опыте таком как в США с ее внутренним энергетическим рынком по возможности регулирования частоты в системе объектов помимо сего прочего появляется перспективность того что помимо оплаты всем участникам такого энергетического рынка дается хорошая возможность по самоуправлению нагрузкой что немало важно в нынешних реалиях.

Таковыми зарубежными задачами является реализация всяческих проектов, основанных на повышении киум таких объектов как генерация, помимо всего речь идёт ещё и о резервном обеспечении энергоснабжения с

возможностью различного регулирования параметров сетей электроэнергетики.

Среди наиболее проблемных или значимых задач решение которых может быть устранено или повыситься значимая эффективность с использованием СНЭ, в основном выделяют 2 самых значимых типа задач выделяют: СНЭ будет применяться как дополнительное или вспомогательное оборудование для таких объектов как генерация с попутным перераспределением функционала по манёвренности различных объектов генерации на СНЭ, всё выше перечисленное необходимо для того чтобы повысить безопасность наряду с более эффективной эксплуатацией оборудования а также расширение различного функционала что в итоге даёт отличное повышение качество выпускаемой продукции.

Что входит в объектовые задачи снэ:

— во-первых это возможность обеспечения правильной работы различных объектов где осуществляется генерация в таких режимах как регулирования частоты в том числе в режиме опрч, нпрч.

— Возможность различного рода исполнения команд соес по уменьшению или же увеличению различные мощности, а также для работы при безопасных режимах изменения различных мощностных реакторных установок.

— Поддержание нагрузке постоянным и неизменным режиме при работе оборудования АЭС скобка (номинальный режим работы), помимо всего это приводит устойчивому повышению энергоблоков АЭС к всевозможным возмущением электросети.

— Также способна повышению значительных высоких показаний киум (повышение различного рода объёма подпускаемый электроэнергии) всё это при работе, АЭС, которая имеет возможность отслеживание суточного графика электрических нагрузок, и помимо всего прочего может регулировать частоту.

— Различные замедления износа установленного заводского оборудования на АЭС во избежание дополнительных ощутимых затрат наряду с положительным экономическим эффектом от срока службы, в таких режимах работы как переменная нагрузка, понижение стоимости и увеличение временного интервала ремонтных работ, значительное повышение эффективности как экономической, так и технической различного рода топливной компании.

— Для электроснабжения собственных нужд АЭС.

— Для многоцелевых потребителей собственных нужд возникает резкая и необходимая нужда в компенсации реактивной мощности, наряду с частотным регулированием.

Систематизированные задачи СНЭ:

— Наблюдается ощутимый недостаток мощности

— Регулирование частоты в режиме работы при реактивной мощности, а также возле электрических сетей и напряжение.

— Сведение к нулю таких неприятных ситуаций для потребителя как проведение аварийных работ, а также избежание причинения материального ущерба.

— Значимое повышение эффективности наряду с таким параметром как надёжность энергетических систем, а также объектов генерации в энергетике в местах, где производится добыча полезных ископаемых и помимо всего прочего также необходимо для распределения генерации.

Такие отрасли как научные технические и информационные источники, обладают нормативной и правовой базой соеэс, все это показала эффективность в применении снэ в качестве такого оборудования, которая обладает манёвренностью и независимостью Китая с АЭС для различного рода объектов генерации.

Неплохой экономический эффект может наблюдаться в том случае, когда накопленная энергия будет отдаваться различным нуждающимся объектам в период повышенных цен, что быстро приведет к окупаемости и

эффективности за счет безостановочной работы других объектов за счет питания их электроэнергией.

Так же появляется возможность в случае накопления существенного объема энергии и дальнейшая экономически выгодная продажа её на ОРЭМ, возможность увеличенного объема за счет компенсации энергопотребления на АЭС таких факторов как собственные нужды.

Снижение потребления насосами работающие на АЭС хотя бы на 11%, может привести к значительной экономии, а также в дополнительном производстве электроэнергии и последующий её даже.

Говоря про применение различного рода накопителей энергии на объектах АЭС, то в такой ситуации будет происходить ощутимый экономический эффект за счет сниженного энергопотребления что в конечном итоге приведен к положительным эффектам таким как компенсация реактивной мощности.

Помимо всего прочего на АЭС будет замечено ощутимое снижение износа оборудования что в конечном итоге выльется в ощутимый экономический и технически моральный эффект что в итоговом случае сможет дать возможность на АЭС обеспечивать энергией собственные нужды.

При участии в НПРЧ и ОПРЧ, значительно увеличиться объем наряду с качеством выпускаемой электроэнергии на АЭС и СНЭ.

Благодаря рынку ОРЭМ появиться значительно эффективно экономическая возможность, которая будет заключаться в том, что появиться возможность продажи излишнего объема энергии наряду с наращиванием мощности из-за слияния со СНЭ.

Эффекты от СНЭ возможно применять не только с генерацией, но также, как и отдельный самостоятельный регулятор системы. Все сетевые компании, а также потребители электроэнергии станут основным источником выгода обладателем. У компаний, которые генерируют электроэнергию, появится возможность на двойное применение СНЭ.

От использования совместно со СНЭ появляется значимый эффективно результативный скачок для экономики, за счет того, что СНЭ будет как отдельный регулятор то в таком случае в энергетической системе будет повышенный показатель без аварийности, а также повышенной надежности что значимо скажется на положительном эффекте для ряда потребителей.

В результате использования эффективного топливного элемента в момент пиков и полу пиков появиться главный критерий, заключающийся в выравнивании нагрузок, что будет положительно и эффективно влиять на всю сеть. Также возможен ещё один экономический эффект если будет снижена затрата на обслуживание, будет сведена к минимуму некачественная работа фильтров, т.е. Иными словами в атмосферу будет выбрасываться меньше вредных веществ и выбросов.

Если мы говорим о проблемах маневренности объектов генерации энергетики, также стабильность энергосистем то наилучший и перспективный идеей будет увеличение, как атомной энергетики, так и любой другой мало маневренной генерации, в то время как высоко маневренная тепловая генерация будет выводиться из эксплуатации.

Обеспечить номинальный режим работы таких объектов как генерация, без потери выработки электроэнергии поможет способ независимого им маневрирующего снэ, который сможет, как накапливать так, выдавать электроэнергию который будет не хватать в пиковые периоды. Чтобы экономический эффект был наиболее выгоден вот внедрения снэ то на работающих и будущих АЭС просто необходимо чтобы реализация групп мероприятий, сосредоточенность которых была бы направлена на новые характеристики и функционирования комплекса СНЭ - АЭС направленный на регулировку возмущений частоты.

В настоящее время заняться вопросом о экономической эффективности и внедрение СНЭ пока что затруднена, но это не отменяет ряда положительных и значимых эффектов, таких как повышение эффективности и повышение качества вырабатываемой электроэнергии».

## 1.1 Отдельные утверждения об обеспечении динамической устойчивости в конкретных условиях

Как известно динамическая устойчивость отличается системой чья способность имеет свойства восстанавливаться после серьёзного возмущения или же состояния практически приближенного к исходному.

Так же немало важно подметить, что устойчивость системы характеризуется синхронной параллельной работой генераторов. Динамическая устойчивость обуславливается сохранением выдаваемой мощности в сеть, при серьезных или непредвиденных нарушениях в электропередаче. Основным и самым серьезным нарушением является короткое замыкание синхронного генератора.

Переходные процессы, возникающие при существенном изменении энергосистемы можно описать выражением движения ротора генератора [1].

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_G = \Delta M, \quad (1)$$

где  $M_T$  - вращающий момент на валу двигателя;

$M_G$  - так называемый момент сопротивления на валу генератора;

$\omega$  – угловая частота вращения вала;

$J$  – общий момент инерции генератора и двигателя;

$\Delta M$  – небаланс моментов.

Из (формула1) [1], написанную выше можно назвать уравнением динамического равновесия, из-за того, что при равенстве моментов угловая частота вращения ротора генератора не изменяется.

По (формула 2) [1] ниже сможем найти электромагнитный момент

$$M_G = \frac{mUE_q}{\omega_1 X_d} \sin(\theta) + \frac{mU^2}{2\omega_1} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta), \quad (2)$$

где  $m$  – число полюсов статора генератора;  
 $U$  – напряжение на шинах генератора;  
 $E_q$  – ЭДС генератора;  
 $\omega_1$  – угловая частота вращения генератора;  
 $X_q, X_d$  – сопротивления по продольным и поперечным осям синхронной машины;  
 $\theta$  – угол нагрузки генератора.

Немаловажно подчеркнуть, что значение электромагнитного момента синхронного генератора, как правило, в числовом эквиваленте может определяться энергией, которая в свою очередь рассеивается на активное сопротивление обмотки статора и во внешнем сопротивлении цепи, иными словами можно сказать, что активной функцией тока статора является момент.

Из выражения выше (формула 2) [1] следует, что оно служит для явнополюсного синхронного генератора, ниже в формулировке будет рассмотрен неявнополюсный синхронный генератор, но не просто генератор, а такой у которого по продольным и поперечным осям индуктивные сопротивления будут равны.

$$M_T = \frac{mUE_q}{\omega_1 X_d} \sin(\theta), \quad (3)$$

где  $m$  – число полюсов;  
 $U$  – напряжение на шинах генератора;  
 $E_q$  – ЭДС генератора;  
 $\omega_1$  – угловая частота вращения генератора;  
 $X_q, X_d$  – сопротивления по продольным и поперечным осям синхронной машины;

$\theta$  – угол нагрузки генератора.

Сейчас будет рассмотрено изменение электромагнитной величины вследствие проявления неожиданного или внезапного возникновения короткого замыкания генератора.

Итак известно, что при коротком замыкании имеет свойство меняться и ток стартера, при нагрузке характерный коэффициент мощности составляет 0.8...0.9, также можно сказать что в большинстве своем проявляется активная часть тока статора, но если говорить про режим короткого замыкания, то в зависимости от того в каком месте произошло короткое замыкание, от его сопротивления и его типа, то с уверенностью можно сказать что активная составляющая падает вплоть до нуля.

Следует учитывать так же что на шинах генератора при коротком замыкании уменьшается и напряжение, электромагнитный момент в своей зависимости так же снижается.

Из выше сказанного можно выделить то что уменьшение электромагнитного момента можно охарактеризовать коротким замыканием. От того что момент турбины неизменный, происходит нарушение балансов по (формула 1), что вскоре приведет к контролю скоростного режима генератора и просто на просто он выйдет из синхронной скорости.

При внезапном отключении нагруженного генератора от сети исчезает его тормозной электромагнитный момент, а вращающий момент турбины, вследствие инерционности действия клапанов и наличия паровых и газовых объемов у паровых и газовых турбин или опасности возникновения гидравлического удара в водоводах гидротурбин, становится избыточным, обуславливая неизбежное повышение частоты вращения агрегата. Заброс частоты вращения при этом зависит от исходной нагрузки, конструктивных особенностей агрегата и характеристик регулирования турбины.

## 1.2 Существующие методы и средства обеспечения устойчивости

На сегодняшний момент главная задача по сохранению устойчивой энергосистемы ложится целиком на автоматику, которая в свою очередь подразумевает надежное обеспечение работы нашей энергосистемы и делает ее устойчивой ко всяким нарушениям или дисбалансам. В надежной работе энергосистемы можно выделить так называемое (АПНУ) такой термин переводится как автоматика для предотвращения нарушения устойчивости различных энергосистем, электростанций, чей режим работы параллелен, помимо всего прочего немаловажной частью (АПНУ) является сохранение работоспособности после серьезных возмущений, ведение изменений в системе.

Отличительные особенности работы и контроля (АПНУ) можно охарактеризовать следующими пунктами:

- в пиковые моменты работы турбины, способно регулировать клапана путем их прикрытия длительностью до нескольких секунд, что в свою очередь продлевает как ресурс, так и создает кратковременную разгрузку.

- создает воздействие на систему регулирования частоты, отвечающую за вращение турбины и смягчает нагрузочный режим, в свою очередь создает длительную разгрузку турбины.

- умение производить отключение генератора от сети для более устойчивой энергосистемы и избежание перегрузки оборудования подстанций.

- отключение потребителей от нагрузки.

- в аварийных случаях, автоматическое увеличение тока возбуждения для дальнейшей и без аварийной работы синхронной машины.

- при нарушении частоты вызванной перегрузками автоматически нагружает генераторы.

- подбор более оптимальных режимов работы служащих для корректной работы сети.

Ниже приведена схема АПНУ служащая для предотвращения неполадок динамической устойчивости на (рисунок 2).

Главный орган пуска (ПО), ведет наблюдения за интенсивностью изменений возмущений в схеме, далее по специализирующемуся устройству, предназначенному для фиксирования тяжести короткого замыкания сокращенно будет (ФТКЗ) имеет возможность для подключения к цепи переменного тока, а также напряжения для контролирования параметров генератора, далее от типа исполнения, орган пуска имеет возможность для контролирования или же снижения активной мощности с возможностью выработки соответствующего сигнала по которому соответственно сработает, в нашем случае затяжное либо же короткое, после чего выработанный определенный сигнал подается на автоматику (АДВ), в механизм управления которой заложены данные таблиц дозирования (ТД) за счет чего и получается воздействовать.

Схема АПНУ [7] служащая для предотвращения неполадок динамической устойчивости (рисунок 2):

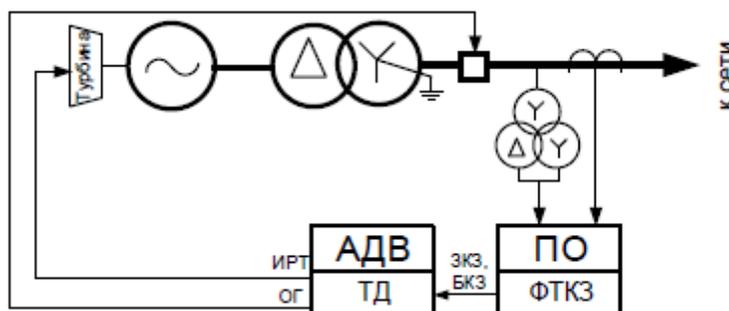


Рисунок 2 - Схема АПНУ служащая для предотвращения неполадок динамической устойчивости [7]

Далее затронем такую тему как кратковременная разгрузка турбины.

При возникновении аварийной ситуации влекущей в свою очередь избыточную кинетическую энергию турбины необходимо предпринять меры по избеганию этой ситуации путем кратковременного отключения или другими словами разгрузки турбины за счет снижения ее момента приведенному в (формула 1) [1] по большей части применяется лишь к тепловым турбинам. Но существует опасность в виде колебаний вызванным резким снижением амплитуды за счет высокой обратной разгрузки. Ко всему прочему есть шанс переторможения который повлечет за собой выход из устойчивости.

Отключение генераторов.

Зачастую отключение генераторов проводят для сохранения устойчивости системы, и имеет два основных параметров, таких как уменьшение небаланса в энергосистеме или же понижении инерции ( $\Delta M$ ) или же по (формула 1) [1].

Основные проблемы, возникающие при отключении генератора:

- повышенные нагрузки во время отключения, которые в свою очередь сказываются на сроке службы гидрогенератора.
- повторный запуск возможен только спустя некоторое время дабы дать остыть, в свою очередь время простоя неблагоприятно сказывается на экономическую сторону.

### **1.3. Устранение противоаварийных возмущений системы при помощи накопителей**

Потребность в энергии не остается постоянной в течение 24 часов в сутки и в течение всего года, а резко меняется в течение суток и в разные сезоны года. Таким образом, пиковые и внепиковые потребности возникают в пределах суток и сезонов в связи с индивидуальными потребностями и климатическими воздействиями. Эти явления требуют накопления энергии.

Главной задачей является поддержание динамической устойчивости системы, обусловленная главным критерием, таким как подача мощности в самый кратчайший интервал времени, что влечет за собой главный недостаток - снижение небаланса.

Ниже на (рисунок 3) [3] будут представлены характеристики быстродействия различных накопителей энергии такие, как проточные батареи, суперконденсаторы, SMES (сверхпроводящий магнитный накопитель энергии), FES (маховик накопитель энергии), PHS (насосный гидроаккумулятор), TES (тепловой накопитель энергии), CAES (сжатый воздух накопитель энергии) и HES (гибридный накопители энергии). На данном рисунке показана зависимость, с которой могут быть использованы различные источники энергии, служащие для повышения противоаварийной эффективности. Аккумулятор энергии может обеспечить гибкую выработку и поставку стабильной электроэнергии для удовлетворения потребностей клиентов.

Характеристики [3] быстродействия различных накопителей энергии (рисунок 3):

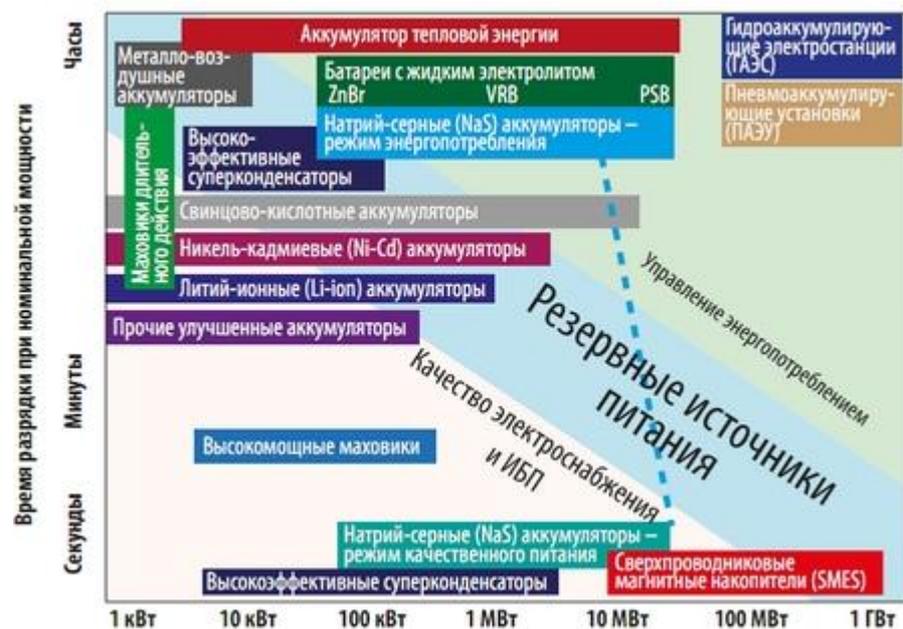


Рисунок 3 - характеристики быстродействия различных накопителей энергии [3]

Роль маховиковых накопителей в сегодняшней энергетике.

Устройства хранения энергии маховика ХЭМ состоят из различных типов маховиков (массивных или составных), двигателя-генератора и магнитных скоб, установленных внутри корпуса. Они имеют очень высокую циклическую мощность со значениями циклов от 10 000 до 100 000. Для электроэнергетических систем требуются маховики большой мощности с меньшими потерями на трение (200 кВт 200-тонного маховика). Эффективность зависит от времени накопления энергии, например, средняя эффективность 85% может снизиться до 78% и 45% через 5 часов и 24 часа (полный день) соответственно. Следовательно, маховики неэффективны для длительного хранения электроэнергии, но их можно использовать в сочетании с другими устройствами. ХЭМ изготовлен из углеродного волокна и может быть низкоскоростным ( $6 \cdot 10^3$  об/мин) или высокая скорость (105 об/мин). Однако высокоскоростная ХЭМ повлечет за собой высокие затраты.

Маховиковые системы обычно работают в высоком вакууме и обладают характеристиками; отсутствие потерь на трение, небольшое

сопротивление ветру, долгий срок службы, отсутствие вредного воздействия на окружающую среду и незначительное техническое обслуживание. ХЭМ может помочь контролировать частоту энергосистемы и обеспечить качество поставляемой электроэнергии. Он в основном используется при производстве возобновляемой энергии, где колебания электроэнергии высоки и часты. Основными недостатками являются низкая плотность энергии и более высокая стоимость обеспечения безопасности системы. В настоящее время его основное использование заключается в дополнении аккумуляторной системы. Ожидается, что благодаря лучшим характеристикам рынок систем хранения энергии с маховиком (ХЭМ) будет расти более высокими темпами. Использование ХЭМ в автомобильной промышленности будет расширяться со временем и совершенствованием технологии. Преимущества ХЭМ многочисленны; высокая мощность и плотность энергии, длительный срок службы и меньшее периодическое обслуживание, короткое время перезарядки, отсутствие чувствительности к температуре, КПД 85–90%, надежность, высокая скорость зарядки и разрядки, отсутствие деградации энергии при хранении, высокая выходная мощность, большой размер емкости хранения энергии и неэнергетическое загрязнение. Основными недостатками и ограничениями могут быть; низкая удельная энергия, короткое время разряда, сложность конструкции, механическое напряжение и усталость, проблемы безопасности из-за высокой скорости вращения ротора и возможности поломки, а также высокая стоимость. Маховики являются менее зрелой технологией по сравнению с батареями, а текущая стоимость слишком высока, что делает их неконкурентоспособными на рынке. Однако стоимость системы можно снизить за счет использования маховиков небольшой мощности. Рынок накопителей энергии на маховиках может вырасти (оценочный объем в 2025 году по рынку, 2019 год составляет 479,3 доллара США) из-за двух основных факторов; промышленное развитие и рост населения вызывают значительное увеличение глобального спроса на электроэнергию, что часто создает частый разрыв между спросом и

предложением энергии в развивающихся странах, что приводит к потребности в резервном питании.

Принципиальная схема источника маховиковой системы накопления энергии (рисунок 4):

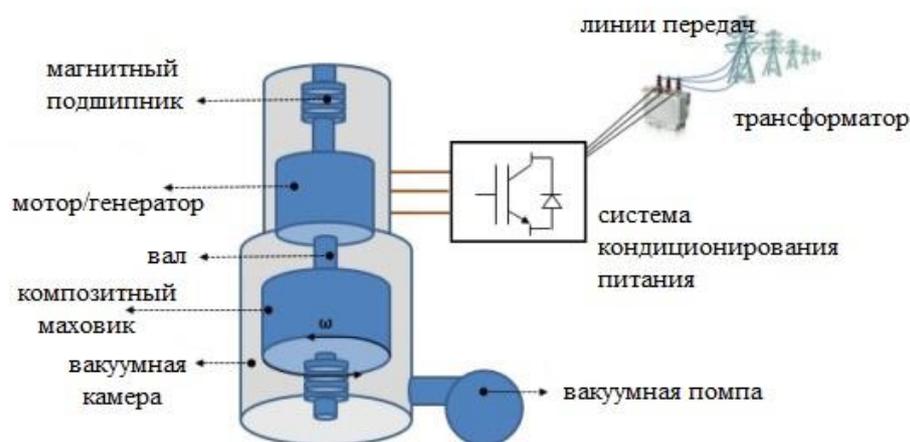


Рисунок 4 - принципиальная схема источника маховиковой системы накопления энергии [7]

Немаловажную роль в современной энергетике получила система сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии (СПИН).

В основе вращающегося сердца современной электрической сети лежит то, что раньше называлось динамо-машиной — генератор, состоящий из стоек меди, вращающихся в электромагнитном поле.

Это механическое вращение, в свою очередь, вращает заполненные медью трубки в магнитном поле. Это индуцирует ток в меди, который затем проходит через современную электрическую сеть — гигантскую цепь — к вашему дому.

Спиновые токи, т. е. поток углового момента без одновременного переноса электрического заряда, играют ключевую роль в современных исследованиях спинтроники. Например, их можно использовать для

управления магнитной динамикой, переключения магнитных моментов и упрощения применения спинтроники для сбора энергии. Генерация спиновых токов широко исследовалась в последнее десятилетие. За счет обратного спинового эффекта Холла (ИСХЭ), токи заряда могут быть преобразованы в спиновый ток, который течет перпендикулярно ориентации потока заряда, и был исследован широкий спектр тонкопленочных металлических и полупроводниковых материалов для эффективной генерации и обнаружения спиновых токов через SHE. Другим широко используемым методом генерации спиновых токов является спиновая накачка с использованием магнитной динамики. Когда магнитная динамика управляется микроволновым (МВ) поглощением ферромагнитного (ФМ) материала, неравновесные спиновые волны накапливаются и рассеиваются с фиксированной скоростью. Один из механизмов диссипации в бислое ФМ/немагнитный (НМ) включает передачу углового момента спинам электронов в НМ-слое, где генерируются спиновые токи. Затем спиновые токи преобразуются в токи заряда через ISHE, как показано на (рисунок 5) (а) [7]. Материалы с высокой спиновой орбитой, такие как Pt, часто используются в качестве хороших материалов SHE для эффективного обнаружения спиновых токов. Хотя это картина возбуждения электрическим зарядом и током, обычно используемая схема для измерений спиновой накачки основана на разомкнутой цепи, где электрические напряжения измеряются и обсуждаются как признаки спиновой накачки.

Представлена схема спиновой накачки (рисунок 5):

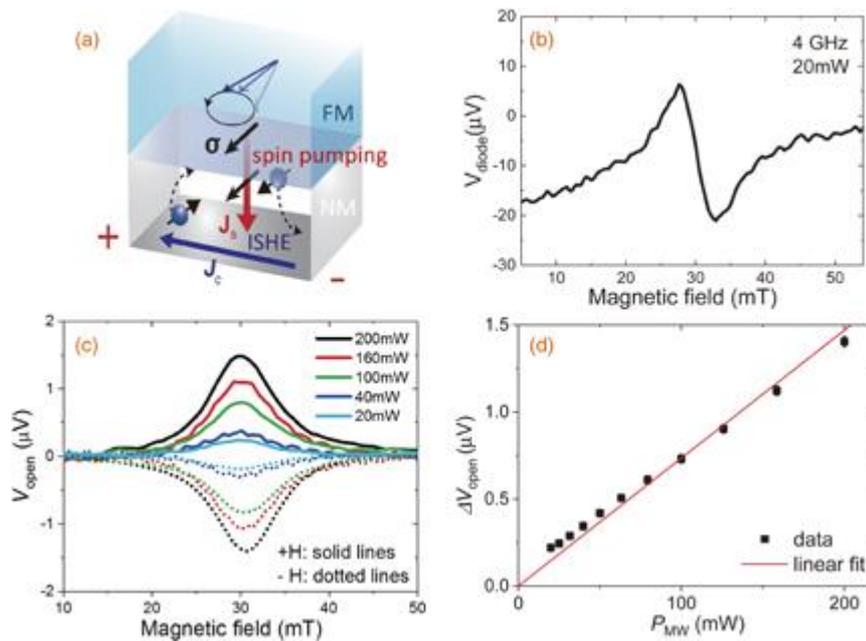


Рисунок 5 - Схема спиновой накачки [7]

Чтобы извлечь электроэнергию из спиновой накачки, используется переменный нагрузочный резистор, чтобы закрыть конфигурацию разомкнутой цепи. Это позволяло токам накачки заряда в образце течь по замкнутой цепи; таким образом, в нагрузочном резисторе произошла конечная мощность рассеяния, которую можно измерить по падению напряжения на нагрузочном резисторе.

#### Вывод

- противодействие аварийным ситуациям при помощи накопителей энергии.
- выбор нескольких групп накопителей и их дальнейшее сочетание друг с другом для подавления возмущений в энергосистемах.
- управление групп накопителей с помощью различных алгоритмов.

За счет накопителей энергии можно решить проблемы с динамической устойчивостью энергетических систем, без дополнительных и время затратных отключений коммутационной генерирующей группы.

## **2 Реализация аккумуляторной системы накопления энергии**

В самом простом варианте аккумуляторная система накопления энергии может быть установлена на вашем объекте как отдельная технология. Наиболее распространенным применением является хранение энергии, вырабатываемой солнечными фотоэлектрическими (PV) панелями, для использования в то время, когда они не генерируют.

Тем не менее, при реализации с использованием нескольких технологий накопление энергии в батареях может максимизировать эффективность выработки энергии на месте, а также расширить возможности зарядки электромобилей, получить доступ к сетевым услугам для получения дохода, повысить энергоэффективность и помочь сократить ваши счета за электроэнергию. Для этого требуется система управления микросетью для управления различными потоками энергии.

Если ваш бизнес оценивает свои цели по нулевому выбросу углерода, аккумуляторная батарея со встроенной системой управления микросетью станет основой вашего сочетания технологий, чтобы превратить ваш объект в интеллектуальную микросеть.

При всем прочем учреждения интенсивной терапии буквально жизнь и смерть нуждаются в источнике бесперебойного питания (ИБП). Кроме того, поставщики услуг сталкиваются с одними из самых строгих требований по сокращению выбросов углерода в любом секторе, в то время как ограниченные бюджеты означают, что обеспечение экономии затрат на энергию также является приоритетом.

Аккумуляторная батарея может иметь смысл для любого потребителя электроэнергии, даже для домашнего использования. Тем не менее, экономическое обоснование становится более ясным по мере увеличения площадки и увеличения спроса на электроэнергию. Везде, где есть несколько потоков мощности, всегда стоит подумать о системе хранения.

От этой технологии выиграют сектора с высоким потреблением электроэнергии, потребностью в устойчивости к внешним воздействиям, производством электроэнергии на месте, сложными или конфиденциальными бизнес-операциями и потребностью в гибкости в использовании энергии. По этой причине аккумуляторные батареи могут стать чрезвычайно мощным инструментом для предприятий в сфере производства, здравоохранения, розничной торговли, обороны и складского хозяйства.

## **2.1 Функция и интеграция СНЭЭ в энергосистему**

СНЭЭ может обеспечить эффективную интеграцию установок ВИЭ в энергосистему с повышением их экономических показателей:

- Выравнивание неравномерности генерации ВИЭ
- Обеспечение балансов электроэнергии и мощности
- Обеспечение устойчивости
- Обеспечение качества электроэнергии
- Оптимальное распределение загрузки генераторов
- Обеспечение резервирования
- Повышение надежности

Помимо вышперечисленного, СНЭЭ решает следующие проблемы в энергосистеме.

- выдача или потребление активной мощности
- компенсация несимметрии
- компенсация несинусоидальности
- выдача или потребление реактивной мощности

У первых трех функций мы должны задействовать активную энергию, которая накоплена в накопителях собственного аккумулятора, а для управления реактивной мощностью, ресурс аккумуляторов не требуется вовсе ведь все это запросто осуществляется встроенными средствами силового преобразователя. У него, как правило, силовые преобразователи предназначены для накопления энергии, в которых, как правило, имеются встроенные классические конденсаторы и вот именно посредством этого обычного конденсатора и силовой электроники в преобразователе происходит регулирование напряжения.

### 2.1.1 СНЭЭ как предмет сглаживания резких изменений мощности

Объект нашего внимания и попутно объектом исследования выступает буровая установка, имеющая резко переменный график нагрузки, показанный на (рисунок 6) [7].

Буровая установка 5000/320.

3 x ДГУ 1250 кВА (1000 кВт)

Резко переменный график нагрузки (рисунок 6):

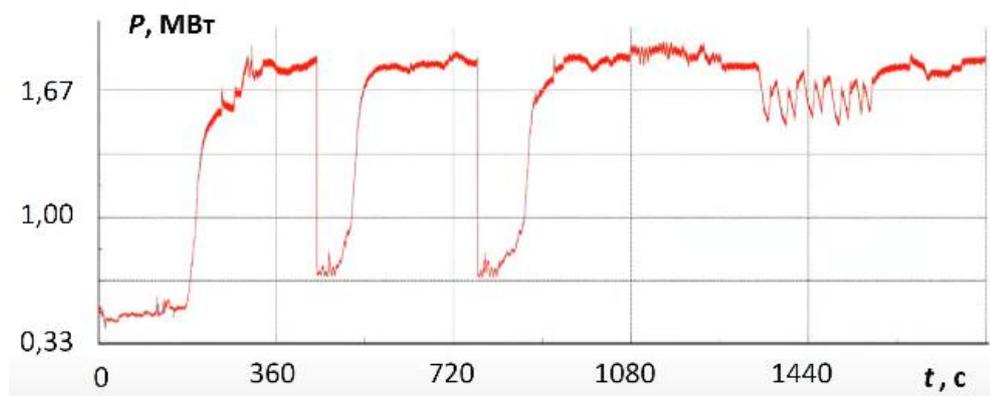


Рисунок 6 - график нагрузки буровой установки [7]

И так из графика следует, что газопоршневые установки очень тяжело воспринимают резкие сбросы и набор мощности, конечно можно эту проблему пытаться решить настройками автоматики но, во-первых это не всегда помогает и не в полной мере, а во-вторых далеко не всегда при покупке зарубежных генераторов, наши специалисты имеют доступ к настройке AVR и APC. Можно вместо газопоршневых использовать дизельные генераторы, но это опять приведет к дороговизне топлива. Как показывает практика зачастую просто берут газопоршневые установки и при проектировании закладывают большее количество чем это нужно по максимуму нагрузки, просто для того чтобы именно относительная величина сброса или набора мощности приходящегося на один генератор было меньше. Но как правило капитальные затраты и эксплуатационные затраты конечно же растут нехило.

План небольшой реальной энергосистемы (рисунок 7):

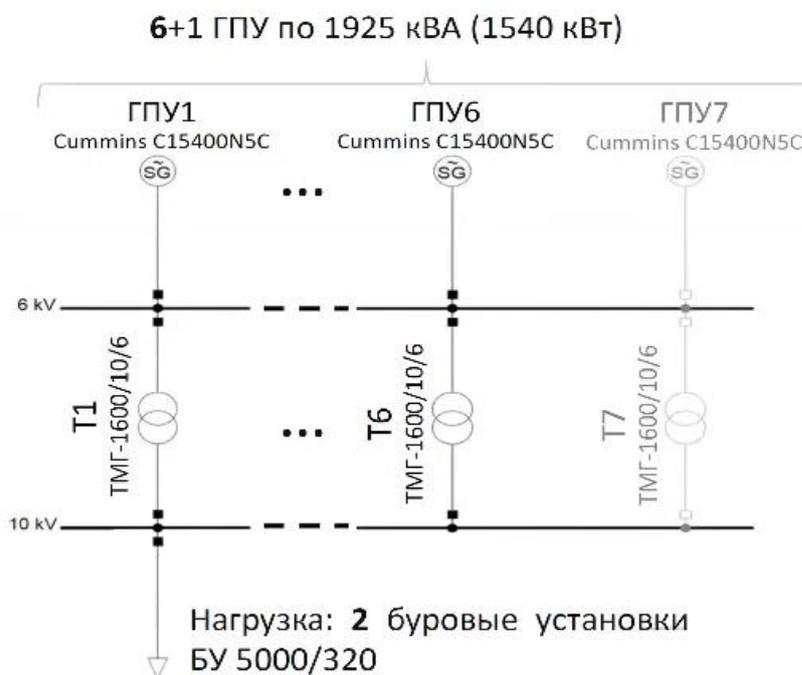


Рисунок 7 – генераторы буровой установки [7]

Как правило, нужно устанавливать 6 генераторов работающих и один в резерве, но резервы сейчас сделаем неактивными.

Моделирование показывает, что 6 генераторов при нагрузке [7] работают отлично (рисунок 8):

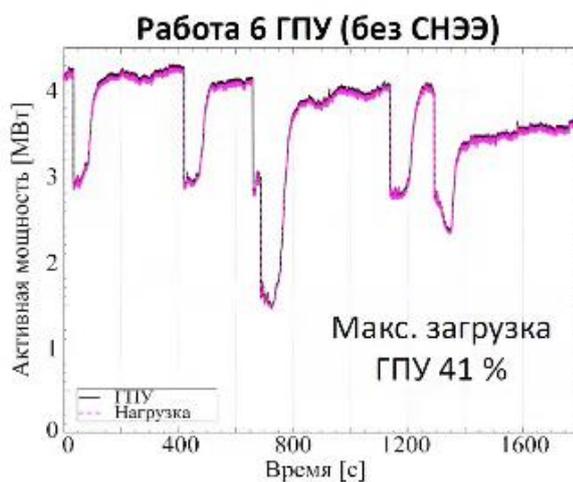


Рисунок 8 – Работа 6 генераторов без СНЭЭ [7]

При работе пяти генераторов получается, что один сброс нагрузки они выдерживают, но вот два сброса которые следуют один за другим как при бурении с проработкой [7], они уже не выдерживают и отключаются.

Отключение пяти генераторов вследствие нагрузки (рисунок 9):

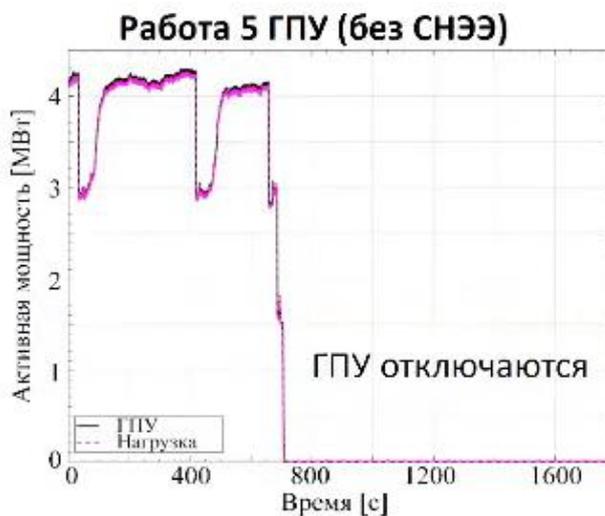


Рисунок 9 – Работа 5 генераторов без СНЭЭ [7]

Нерешенные проблемы:

- Сброс и наброс нагрузки, способные приводить к отключениям ГПУ.
- Необходимость установки большего количества ГПУ, чем это требует величина максимальной мощности нагрузки.
- Низкая загрузка ГПУ, неоптимальный расход топлива и моторесурса.

При всем этом, если внедрить систему накопления энергии, которая будет небалансы принимать на себя и обеспечить плавное изменение мощности генераторов как видно из графика, показанного на (рисунок 10) [7], появляется возможность снижать количество генераторов до трех или четырех штук. Экономия будет проявляться в затратах как минимум на один генератор.

Плавное изменение мощности генераторов (рисунок 10):

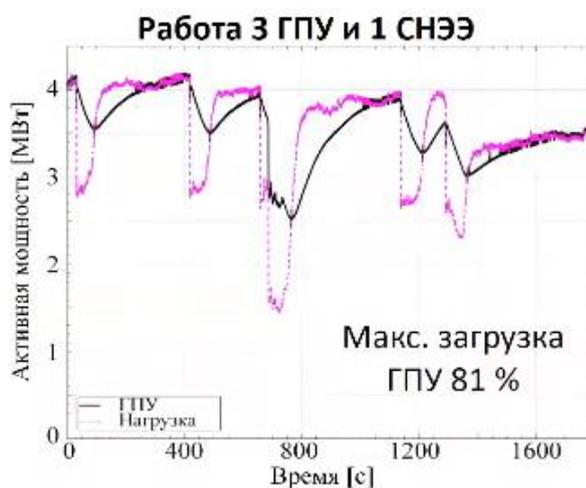


Рисунок 10 – Работа 3 генераторов с применением одной СНЭЭ [7]

Решенные проблемы:

- Сглаживание резких изменений мощности при помощи СНЭЭ.
- Снижение требуемого количества ГПУ.

В России не такой высокий тариф на электроэнергию чтобы можно было просто накапливать и ночью выдавать или днем и получать огромные прибыли. Такого пока не, но есть другая ситуация, у промышленных предприятий очень высокие тарифы на электрическую энергию зачастую уже сопоставим с зарубежными странами, при этом есть возможность гибкого изменения тарифов.

На предприятиях имеется много тарифов, таких как одно ставочный или много ставочный, где отдельно, в том числе платится за мощность, за энергию, за мощность в пиковый час, за мощность просто пиковой нагрузки.

Проблемы:

- Высокая мощность нагрузки на предприятия в максимальный час энергосистемы, в часы высокой стоимости ЭЭ.
- Большие расходы на оплату мощности и электрической энергии.

Решение при внедрении СНЭЭ:

- Снижение мощности, потребляемой из сети в максимальный час энергосистемы, за счет выдачи энергии из СНЭЭ.
- Потребление из сети большего количества энергии в часы ее минимальной стоимости, запасание в СНЭЭ.

Применение СНЭЭ для снижения мощности [5], потребляемой из сети в максимальный час энергосистемы 6 часов (рисунок 11):



Рисунок 11 – График изменение мощности при применении СНЭЭ [5]

## 2.2 Пропускная способность распределительных сетей с применением систем накопления электрической энергии

Стоит понимать что под повышением пропускной способности РС совместно со СНЭЭ, как правило, следует понимать увеличение протекаемой электроэнергии, в связи с этим возникшим объемом часть электроэнергии может быть распределена [17] на дополнительные нагрузки из-за высокой загрузки суточного оборудования.

$$W_{ЭЭ} = \sum_{i=t_1}^{t_2} (P_{нб_i} + P_{СНЭЭ_i}) \Delta T, t_1 \leq t_{нб} \leq t_2, \quad (4)$$

где  $P_{нб_i}$  – наибольшая допустимая нагрузка на шинах 0,4 кВ ТП в течение суток, величина, которой ограничена номинальной мощностью трансформатора подстанции  $S_{ном}$  так, что при  $\cos\varphi=1$  должно выполняться условие  $P_{нб_i} \leq P_{ном}$ ;

$P_{СНЭЭ_i}$  – нормированная выходная активная мощность СНЭЭ в режиме разряда, учитывающая энергетическую эффективность накопителя;

$\Delta T$  – приращение времени;  $t_{нб} \in \{P_{нг_i} > P_{ном}\}$  – период максимальных нагрузок;

$P_{нг_i}$  – фактическая нагрузка на шинах 0,4 кВ ТП.

В случае применения СНЭЭ для снижения неравномерности графика нагрузки увеличение пропускной способности РС составит (формула 5) [17].

$$\begin{aligned} P_{\text{доп.тех.прис.}} &= \max \{P_{СНЭЭ_i}\}_{i=[t_1, t_2]} = \\ &= \max \{P_{нг_i} - P_{нб_i}\}_{i=[t_1, t_2]}. \end{aligned} \quad (5)$$

Однако если мощность нагрузки в часы пикового энергопотребления не превышает номинальную мощность трансформатора  $P_{нгi} \leq P_{ном}$ , доступная мощность технологического присоединения определяется как (формула 6) [17].

$$P_{тех.прис.} = P_{ном} - \max \{P_{нгi}\}_{i=[0,24]} \quad (6)$$

Из (формула 6) следует, что способность пропускной электроэнергии РС совместно со СНЭЭ определяется доступной мощностью технологического присоединения. Из (формула 5) можно утверждать увеличение пропускной способности РС с СНЭЭ определяется увеличением доступной мощности технологического присоединения. Последнее принято в качестве первого критерия повышения пропускной способности РС.

Максимальное отклонение напряжения в прилегающем к ИЭР на базе ВИЭ узле РС  $U_2$  в течение суток определяется (формула 5) [17].

$$\delta U_{\pm} = \frac{|U_2 - U_0|}{U_0}, \quad (7)$$

где  $U_0$  – стандартное номинальное напряжение;

$U_2$  – расчетное значение напряжения узла, которое определяется как [17].

$$U_2 = U_1 - \frac{(\max \{P_{нгi} - P_{генi}\}_{i=[0,24]}) R_{л} + \max \{Q_{нгj}\}_{j=[0,24]} X_{л}}{U_1}, \quad (8)$$

где  $R_{л}$ ,  $X_{л}$  – активное и реактивное сопротивление;

$P_{нг_i}$ ,  $Q_{нг_j}$  - активная и реактивная мощность нагрузки данного участка сети соответственно;

$U_1$  -напряжение в точке подключения ИЭР на базе ВИЭ;

$P_{ген_i}$  – активная мощность генерации ИЭР на базе ВИЭ.

Ввиду низкого значения отношения X R для распределительных сетей [17] и низкого значения  $Q_{ген}/P_{ген}$  для ИЭР на базе ВИЭ, влияние генерации и потребления реактивной мощности ИЭР на базе ВИЭ на напряжение в прилегающей сети не учитывается.

На основании анализа (формула 7 и 8) можно сделать вывод, что увеличение  $P_{ген}$  одновременно со снижением  $P_{нг}$  может привести к возникновению недопустимых положительных отклонений напряжения на шинах 0,4 кВ ТП в прилегающей к ИЭР на базе ВИЭ РС. Последнее может стать причиной вынужденного снижения мощности  $P_{ген}$  период минимальных нагрузок, что, в свою очередь, повлечет за собой снижение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) ИЭР на базе ВИЭ (формула 9) [17].

$$K_{киум} = \sum_{i=n}^N \frac{P_{ген_i}}{t_i} / P_{уст} \quad (9)$$

где n, N – границы рассматриваемого интервала времени;

$P_{ген_i}$  – фактическая мощность ИЭР на базе ВИЭ в момент времени  $t_i$ ;

$P_{уст}$  – установленная мощность ИЭР на базе ВИЭ.

Из вышеперечисленного можно утверждать, что хоть и возникновение недопустимых отклонений напряжения не является проблемой пропускной способности сети, тем не менее, является одним из факторов,

ограничивающих мощность ИЭР на базе ВИЭ. Применение СНЭЭ, обеспечивающих соответствующее изменение потокораспределения мощностей по ветвям и напряжения в узлах РС, позволяет предотвратить возникновение недопустимых отклонений напряжения у потребителей и увеличить КИУМ генерации на базе ВИЭ, в связи с чем снижение отклонений напряжения на шинах 0,4 кВ ТП в прилегающей к ИЭР на базе ВИЭ РС принято в качестве второго критерия повышения пропускной способности РС с СНЭЭ.

Целью данной статьи является определение наиболее значимых факторов для повышения пропускной способности РС с СНЭЭ по критериям увеличения доступной мощности технологического присоединения и снижения отклонений напряжения на шинах 0,4 кВ ТП в прилегающей к ИЭР на базе ВИЭ сети на основе регрессионного анализа.

Решаются следующие задачи:

- Определение независимых факториальных признаков и границ их изменения для рассматриваемых критериев повышения пропускной способности РС.

- Разработка регрессионных математических моделей доступной мощности технологического присоединения и отклонения напряжения на шинах 0,4 кВ ТП.

- Ранжирование степени влияния параметров и режимов работы электросетевого оборудования на повышение пропускной способности РС с СНЭЭ для каждого критерия. При решении поставленных задач использовалась линейная множественная регрессионная модель [17].

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon(x). \quad (10)$$

В качестве инструмента моделирования применялся программный комплекс PSS SINCAL, позволяющий выполнить расчеты.

## 2.3 Коммерческое хранение аккумуляторов

Коммерческое аккумуляторное хранилище обычно представляет собой крупномасштабную батарею. Эти батареи могут быть установлены внутри вашего помещения или в контейнере снаружи, их можно заряжать от вашей локальной генерации, такой как солнечная фотоэлектрическая энергия, или от сети в периоды дешевой энергии.

Батарея, предназначенная для предприятий и организаций [13], чтобы максимально эффективно использовать их энергопотребление (рисунок 12):

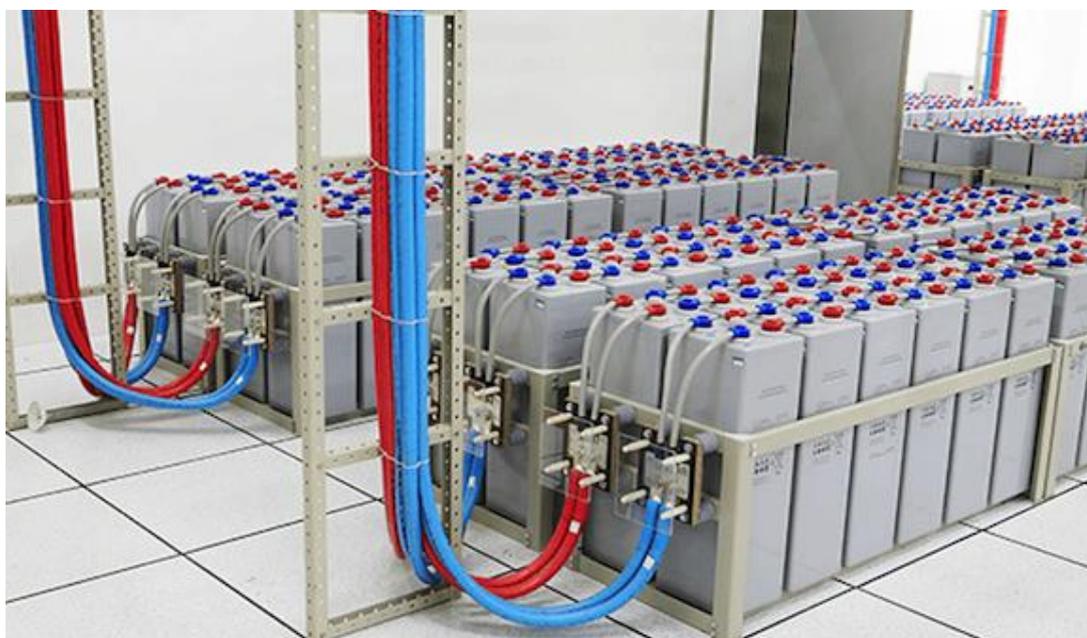


Рисунок 12 – Коммерческое аккумуляторное хранилище [13]

Это имеет несколько преимуществ, которые включают в себя:

Сохранение избыточной энергии, вырабатываемой ветром или солнцем, для последующего использования или продажи обратно в сеть с помощью контракта на обслуживание сети. Это известно как возобновляемое укрепление.

Обеспечение отказоустойчивости электропитания и возможности ИБП даже в случае отключения электроэнергии или понижения напряжения.

Получение дохода, заряжая дешевую энергию и продавая ее обратно в сеть в часы пик.

Сокращение своих затрат на электроэнергию, используя накопленную энергию в часы пик, используя сглаживание пиковых нагрузок и переключение нагрузки.

Помимо накопления энергии и использовании ее с помощью накопителей энергии, немало важно не забывать про управление нагрузкой.

Управление нагрузкой — это активный контроль потребления электроэнергии. Это включает в себя ряд методов, используемых для лучшего баланса спроса и предложения в масштабе сети, а также для максимизации энергоэффективности и минимизации затрат для отдельного объекта.

Управление нагрузкой является важной частью идеи интеллектуальной сети, использующей сложное машинное обучение и элементы управления для динамического баланса доступной мощности с потребностью. Интеллектуальный мониторинг и управление позволяют сбалансировать сеть как активных, так и реактивных нагрузок.

Переключение нагрузки — это ключевой аспект управления нагрузкой, который используется как в масштабе сети для балансировки спроса и мощности, так и на объектах для снижения затрат. В качестве примера можно привести перенос процессов с высоким потреблением энергии, таких как некоторые производственные процессы, на время суток вне периодов пиковой нагрузки. Это помогает доступной генерации удовлетворять спрос в периоды пикового спроса, а также обеспечивает дополнительный спрос для удовлетворения общего объема генерации, поступающей в сеть в другие периоды. Переключение нагрузки можно использовать для снижения затрат на электроэнергию на отдельном объекте или в организации, сводя к

минимуму мощность, приобретаемую в часы пик, и вместо этого используя другие периоды, когда затраты на электроэнергию ниже.

Сброс нагрузки, напротив, представляет собой общее снижение общего потребления электроэнергии на объекте (тогда как смещение нагрузки продолжает потреблять то же общее количество энергии, только в разное время). Некоторые формы сброса нагрузки известны как управляемое понижение напряжения, при котором питание определенных систем снижается или отключается, чтобы предотвратить более масштабные сбои в подаче электроэнергии.

Поскольку большинство негибких источников энергии подключаются к сети, управление нагрузкой имеет жизненно важное значение в масштабе сети, чтобы сбалансировать колебания производства и спроса. Все чаще сетевые батареи выполняют важную функцию управления нагрузкой, сохраняя или высвобождая дополнительную мощность по мере необходимости. На уровне объекта управление нагрузкой может помочь организации снизить общие затраты на электроэнергию, а также защитить объект от риска широкомасштабного перебоя в подаче электроэнергии и поддерживать работу критически важного оборудования.

Чтобы оптимизировать производственные затраты и повысить доступность и производительность установок, разработчики возобновляемых источников энергии должны иметь возможность производить энергию с повышенной эффективностью оборудования.

Следовательно, необходимо ввести новые направления исследований для повышения производительности системы хранения. Таким образом, сбор данных таких систем, а также обработка и анализ данных являются актуальными. Эта работа находится между вопросами, связанными со сложностью систем хранения и их эксплуатации, и оценкой производительности систем для диагностики и прогнозирования.

Целью является представление результатов общего подхода к поддержке эксплуатации систем накопления энергии и глобальной

энергоэффективности фотоэлектрических систем хранения с использованием анализа рабочих данных.

Применения накопления энергии разнообразны, например, укрепление возобновляемой мощности, временной сдвиг электроэнергии, регулирование частоты и поддержка напряжения. Однако отзывы об этих системах редко представлены в литературе. Авторы представили метод диагностики хранилища на основе анализа работы с реальными данными. Основная цель этого исследования заключалась в том, чтобы понять, как использовать BESS, чтобы иметь возможность воспроизвести его в лаборатории на отдельных клетках.

Одним из ключевых факторов работоспособности сложных систем является поддержание их в нормальном рабочем состоянии. Чтобы предложить подходящие методы поддержки операций, должна быть предложена методология понимания реального процесса. Для этого обзор литературы привел нас к подходу, адаптированному к системам хранения. Он получен из области РНМ (Прогностика и управление здравоохранением). Кроме того, подход РНМ направлен на повышение надежности и доступности сложных систем в течение их жизненного цикла. Предлагаемая функциональная архитектура показана на (рисунок 13). Этот подход направлен на повышение эффективности и доступности сложных систем хранения в соответствии со следующими вспомогательными функциями:

Обработка данных: это ключевой шаг в развитии передовых подходов к системному анализу. На первом этапе сбор данных мониторинга выполняется автоматически. Затем обработка данных структурирует необработанные данные и извлекает ключевые показатели эффективности с использованием статистических методов. Предлагается пять основных семейств индикаторов: о Индикаторы работы IdO.

Индикаторы состояния IdE

- индикаторы запросов IdS

- показатели эффективности IDP

- сравнительные показатели IdC

Диагностика: этот шаг был направлен на локализацию неисправного компонента и определение характера отказа в соответствии с подходом «следствие-причина». Используемые методики ориентированы на методы диагностики, основанные на обработке данных. Существуют и другие методы диагностики, основанные на знаниях (экспертная система, FMECA и т. д.) и модельные методы. Здесь мы используем функцию мониторинга, которая вычисляет новое семейство индикаторов: индикаторы диагностики (IdX): эти индикаторы рассчитываются непосредственно на основе фактических измерений батареи: ток, состояние заряда, напряжение, температура и т. д. Мониторинг этих измерений и их лимиты — это инструмент для выявления сбоев.

Прогноз: целью прогноза является предсказание будущего состояния системы. В своей работе мы стремимся оценивать показатели состояния здоровья на основе методов мониторинга и анализа отклонений. Что касается диагностики, мы используем функцию мониторинга и различаем три прогностических подхода: на основе моделей, на основе данных и на основе опыта. Здесь мы используем функцию мониторинга, которая вычисляет новое семейство индикаторов:

Индикаторы работоспособности IdH: эти индикаторы рассчитываются на основе измерений батареи: время, ток, состояние заряда, напряжение и температура. Мониторинг этих показателей позволяет прогнозировать ухудшение работы аккумуляторной системы. Помощь в эксплуатации: этот последний этап принятия решений помогает оптимизировать работу системы в целом.

Этот план действий может соответствовать техническому обслуживанию системы хранения.

Средствами диагностики/прогноза [29], запускается план действий (рисунок 13):

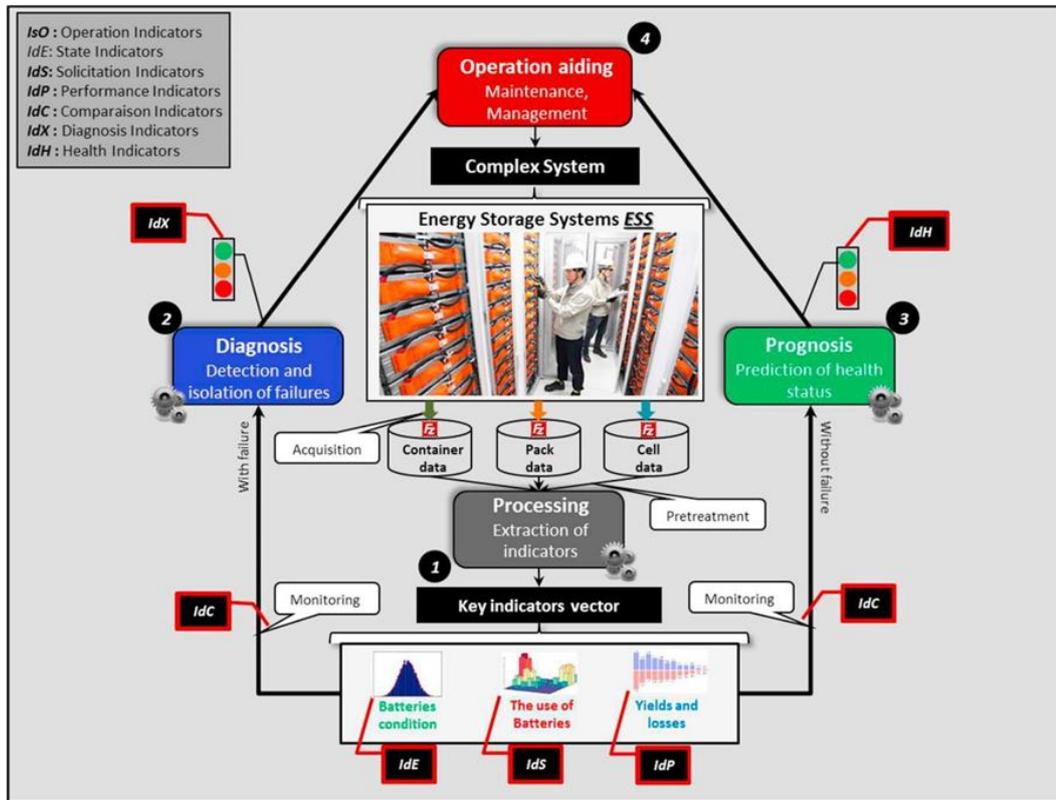


Рисунок 13 - Архитектура диагностики/прогноза [29]

## 2.4 Расширенный инструмент анализа данных «А4»

Было проведено исследование операционных систем, которое привело нас к разработке расширенного инструмента анализа данных «А4». Это результат применения архитектуры, описанной выше. Это включает в себя разработку первой вспомогательной функции, в частности: сбор данных, предварительная обработка и обработка. Таким образом, этот инструмент анализа позволил извлечь показатели эффективности путем преобразования необработанных данных в соответствующую информацию. Этот инструмент был разработан с использованием объектно-ориентированного программирования и GUI (графического пользовательского интерфейса) в Matlab©. Сначала он был разработан для систем хранения, а затем распространен на другие компоненты возобновляемой энергии, подключенной к сети, с системами хранения электроэнергии (ESS). Интерфейс является общим и полезен для нескольких электростанций.

Список компонентов автоматически адаптируется в соответствии с электрической архитектурой электростанции. Выбор параметра автоматически адаптируется к типу выбранного компонента. Календарь позволяет выбрать дату, на которую должен быть сделан анализ. Выбор периода позволяет выбрать период анализа: день, неделя, месяц или год.

Полный охват этого [29] инструмента (рисунок 14):

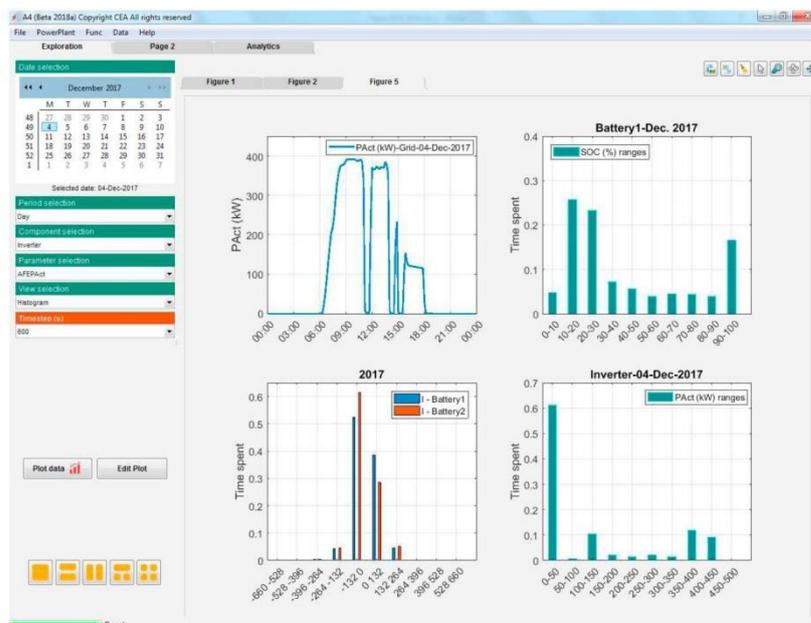


Рисунок 14 - Расширенный инструмент анализа данных [29]

Функциональные возможности интерфейса «А4», предназначенные для анализа производительности и использования систем хранения и электростанций на возобновляемых источниках энергии: Проверка состояния заряда для одной батареи Визуализация временных рядов всех:

- измерений для одного компонента.
- Визуализация временных рядов одной переменной для всех батарей.
- Индикатор состояния для SoC, T и т. д.
- Индикатор состояния с несколькими переменными для SoC, напряжения и температуры и т. д.
- Индикатор запросов с гистограммами
- Тепловые карты одного параметра, позволяющие увидеть плотность параметра в каждом диапазоне
- Индикатор сравнения времени для одного компонента.
- Индикатор сравнения модулей для всех аккумуляторов.
- Показатели эффективности (КПД) для одного или всех компонентов одного типа

- Индикатор работы одного или всех аккумуляторов.

Использование системы суммируется по количеству часов и количеству дней.

Месячное сравнение [29] работы одной батареи (рисунок 15):

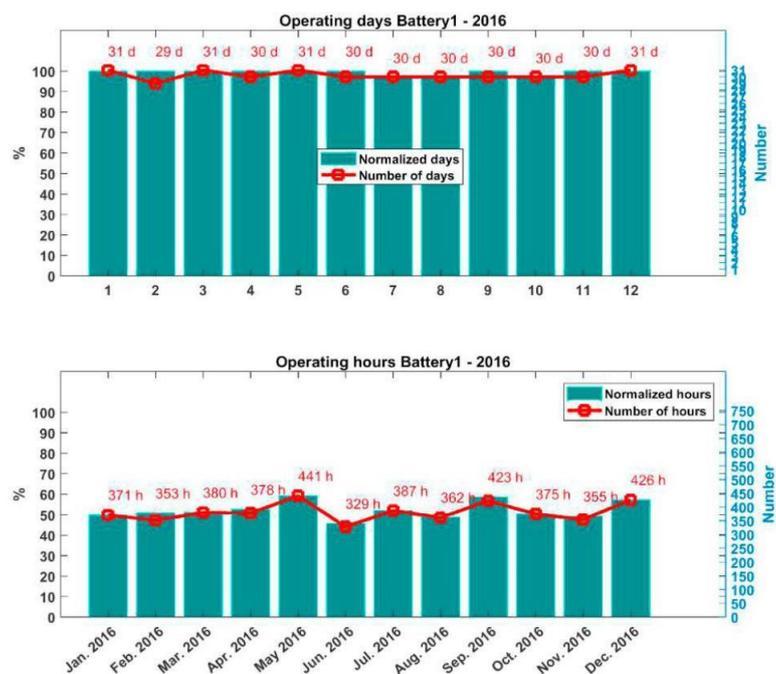


Рисунок 15 - Работа от батареи за весь 2016 год [29]

## **2.5 Основные неисправности литий-ионных аккумуляторов и их причина.**

Внутренние неисправности батареи трудно обнаружить, так как работа внутри литий-ионного элемента до сих пор полностью не изучена. Некоторыми примерами внутренних неисправностей батареи являются перезарядка, чрезмерная разрядка, внутреннее и внешнее короткое замыкание, перегрев, ускоренная деградация и тепловой разгон. Все эти неисправности влияют на работу аккумулятора, но наиболее опасными являются ускоренная деградация и тепловой выход из строя, поскольку они могут существенно повлиять на применение литий-ионных аккумуляторов или нанести прямой вред пользователям. Внутренние неисправности часто обнаруживаются по аномальным реакциям на работу батареи, которые включают падение напряжения, повышение температуры, увеличение внутреннего сопротивления и физические изменения, такие как вздутие.

Перезаряд — это неисправность, которая может привести к более серьезным неисправностям, таким как ускоренная деградация и тепловой разгон. Это может произойти в литий-ионных элементах из-за изменения емкости элементов в блоке, неправильного измерения напряжения и тока.

Обычный аккумулятор также может перезарядиться, когда зарядное устройство выходит из строя. Перезаряд литий-ионных аккумуляторов приводит к электрохимическим реакциям между компонентами аккумулятора и потере активных материалов. Кроме того, в герметичных батареях скопление газов может привести к взрыву батареи. Кроме того, температура поверхности батареи значительно возрастает, прежде чем она начнет перезарядаться. Это приводит к образованию толстого слоя SEI, а также вызывает внутреннее короткое замыкание внутри батареи.

Перезаряженный катод подвержен разложению электролита, растворению металла и фазовому переходу, что в конечном итоге может привести к тепловому разгону и возгоранию.

Переразряд, как и перезаряд, может быть вызван неправильными измерениями напряжения и тока, а также неточной оценкой SOC. В сканирующая электронная микроскопия и рентгеновская дифракция показали, что переразряд может быть вызван отложением меди на электродах батареи. Исследования электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) также показывают, что во время переразряда батареи импеданс анода намного меньше, чем у катода, а это означает, что изменение SEI на аноде намного больше, чем на катоде, что приводит к потере емкости и току. коллекторная коррозия. Чрезмерная разрядка может повлиять на срок службы и термическую стабильность литий-ионного элемента и привести к значительному вздутию элемента. Потенциал анода также аномально возрастает во время переразряда, что может вызвать окисление Cu в ячейке до ионов  $Cu^{2+}$ . Растворенные ионы  $Cu^{2+}$  могут привести к миграции через сепаратор и, в конечном счете, к внутреннему короткому замыканию.

Короткое замыкание в литий-ионных аккумуляторах может происходить как снаружи, так и внутри. Внутреннее короткое замыкание возникает при выходе из строя изолирующего разделительного слоя между электродами. Этот отказ сепаратора можно объяснить плавлением из-за высокой температуры, деформации клеток, образованием дендритов или ударом сжатия. Все это может привести к проникновению через разделительный слой или к высвобождению ионов и электронов лития на аноде и их перемещению через электролит к катоду, что вызывает контакт между анодом и катодом, что приводит к внутреннему короткому замыканию. Когда происходит это явление, электролит имеет тенденцию разлагаться в результате экзотермической реакции, что приводит к тепловому разгону. Тепловой разгон в основном вызван накоплением тепла в результате короткого замыкания. В целом, ячейки высокой емкости подвержены более высокому риску теплового выхода из строя из-за внутренних коротких замыканий, чем ячейки нормальной емкости.

Внешнее короткое замыкание обычно происходит, когда выводы соединены цепью с низким сопротивлением. Другой причиной является утечка электролита из-за вздутия элемента из-за газообразования в результате побочных реакций при перезарядке. Это также может произойти из-за погружения в воду и ударной деформации. Внешнее короткое замыкание возникает, когда внешний теплопроводный элемент одновременно контактирует с положительной и отрицательной клеммами, вызывая электрическое соединение между электродами. Исследование пришло к выводу, что из-за внешнего короткого замыкания диффузия ионов лития в отрицательном электроде приводит к ограничению тока, а тепло, выделяемое при разложении электролита в положительном электроде, ответственно за возникновение теплового разгона. Внешнее короткое замыкание также приводит к избыточной разрядке, запасенной в клетке энергии.

Литий-ионная батарея может перегреться, если регулятор напряжения генератора выйдет из строя, отправив высокое напряжение обратно в батарею и вызвав перегрев. Перегрев также может быть вызван внешними и внутренними короткими замыканиями. Перегрев батареи ускоряет деградацию катода и приводит к росту SEI на аноде. В результате перегрева происходит значительная потеря емкости. Перегрев литий-ионной батареи может привести к разрушению материалов внутри батареи и образованию пузырьков газа, и, в большинстве случаев, повышение давления приводит к вздутию батареи и возможному взрыву. Другим последствием перегрева является тепловой разгон, который происходит потому, что при критической температуре происходит разгон, поскольку тепло не может уйти так быстро, как оно образуется.

Деградация элементов является общей характеристикой большинства аккумуляторов и возникает по разным причинам, например, из-за старения и механизмов саморазряда. Однако ускоренная деградация является ненормальной и может вызвать серьезные проблемы с литий-ионными

батареями. Процесс деградации ускоряется при хранении при повышенных температурах. Внешняя деградация также ускоряется из-за таких факторов, как увеличение импеданса, более высокая частота цикла, изменение SOC и скорости напряжения. Некоторыми механизмами ускоренной деградации являются коррозия токосъемников, изменения в материале электродов и реакции между электродами и электролитом. Ускоренная деградация может привести к сокращению срока службы батареи, что может стать серьезной проблемой в таких приложениях, как электромобили. Это также может вызвать образование поверхностного слоя и ухудшение контакта, что приводит к разрушению электрода, разрушению материала и потере лития.

Эти явления могут приводить к транспортным барьерам, что приводит к пробитию сепаратора и вызывает внутреннее короткое замыкание и, в конечном счете, тепловой разгон.

#### Вывод

Накопление энергии — это способность захватывать энергию в один момент времени для использования в более позднее время. Устройства хранения могут сохранять энергию во многих формах (например, химическую, кинетическую или тепловую) и преобразовывать ее обратно в полезные формы энергии, такие как электричество.

При поддержке правительства и промышленности исследования и разработки в области технологий хранения энергии могут продолжать развиваться и расширяться. Спрос на хранение будет сохраняться из-за его уникальной роли в обеспечении энергетической устойчивости и его способности помочь хранить постоянно растущее количество чистой и переменной возобновляемой энергии на благо всех сообществ в будущем.

Широкое внедрение технологий накопления энергии, в течение следующих нескольких десятилетий может иметь большое значение для достижения научно обоснованной цели достижения нулевого уровня выбросов к середине века.

Быстрый рост переменных возобновляемых источников энергии, а именно солнечной фотоэлектрической (PV) и ветровой, стимулирует усилия по модернизации системы электроснабжения. При высоких уровнях проникновения переменная возобновляемая энергия увеличивает потребность в ресурсах, которые способствуют гибкости системы. Это гарантирует, что стабильность системы поддерживается за счет согласования спроса и предложения электроэнергии. Аккумуляторное хранение является одним из вариантов повышения гибкости системы в этих обстоятельствах за счет управления колебаниями электроснабжения.

Аккумуляторная система накопления энергии обеспечивает больший контроль и гибкость использования электроэнергии, поскольку ее можно установить «за счетчиком», то есть на вашем собственном объекте, и ее можно использовать параллельно для различных функций, таких как:

- надежность электропитания благодаря источнику бесперебойного питания (ИБП)
- максимальное увеличение генерации на месте за счет хранения энергии для использования в разное время.
- доступ к сетевым услугам для продажи электроэнергии обратно в национальную сеть и получения дохода
- экономия денег за счет переключения при использовании энергии из сети
- буферизация больших нагрузок, таких как зарядка электромобилей (EV), от сети, чтобы их можно было проще и дешевле подключить, и объединение всего этого для превращения вашего сайта в интеллектуальную микросеть.

Надежный доступ к электричеству необходим большинству современных предприятий и используется изо дня в день для обеспечения бесперебойной работы. Многие предприятия не рассматривают это как

область, над которой они имеют большой контроль, и большинство из них полагаются исключительно на подключение к национальной сети. Это приводит к тому, что у них очень мало гибкости и контроля над использованием энергии, что может привести к растрате энергии и увеличению углеродного следа.

Локальное хранение энергии позволяет предприятиям хранить свои энергоресурсы локально, повышая уровень контроля и гибкости в отношении того, как используется их энергия.

Локальное хранение энергии [29] предлагает предприятиям альтернативный способ снабжения энергией своих объектов (рисунок 16):



Рисунок 16 – локальное хранение энергии [29]

### **3 Конфигурация системы и системы управления маховика**

Базовая схема состоит из системы накопления энергии, силового электронного интерфейса LCL-фильтр и трехфазный источник, представляющий собой электрическую сеть, как показано на (рисунок 17).

Система накопления энергии в этом случае представляет собой маховик, соединенный с индукционной машиной. Индукционная машина используется для преобразования энергии. Силовая электроника состоит из двух преобразователей напряжения, соединенных через общую связь. Один преобразователь источника напряжения взаимодействует с преобразователем энергии и системой хранения другой посредством системы электрической сети.

Система накопления энергии маховика имеет три режима работы:

- Режим зарядки
- Режим ожидания
- Режим разряда

В режиме заряда преобразователь, взаимодействующий с системой электросети, работает как выпрямитель, а другой как инвертор, с переданной энергией, ускоряющий маховик до его номинальной скорости. В этом режиме энергия запасается в маховике в виде кинетической энергии.

Поток энергии идет от сетевой системы к маховику с индукционной машиной в качестве энергии преобразователя.

Как только маховик достигает скорости заряда, система хранения находящаяся в режиме ожидания, готова к разряду, когда на шине РСС наблюдается падение напряжения.

В режиме разряда преобразователь, взаимодействующий с энергосистемой, работает как инвертор, подача требуемого напряжения последовательна с линией для устранения провала напряжения.

Маховиковый преобразователь работает как выпрямитель. Маховик замедляется, когда он разряжается. В этом режиме накопленная энергия

используется для коррекции провисания, а поток энергии идет от маховика к гидросистеме (рисунок 17):

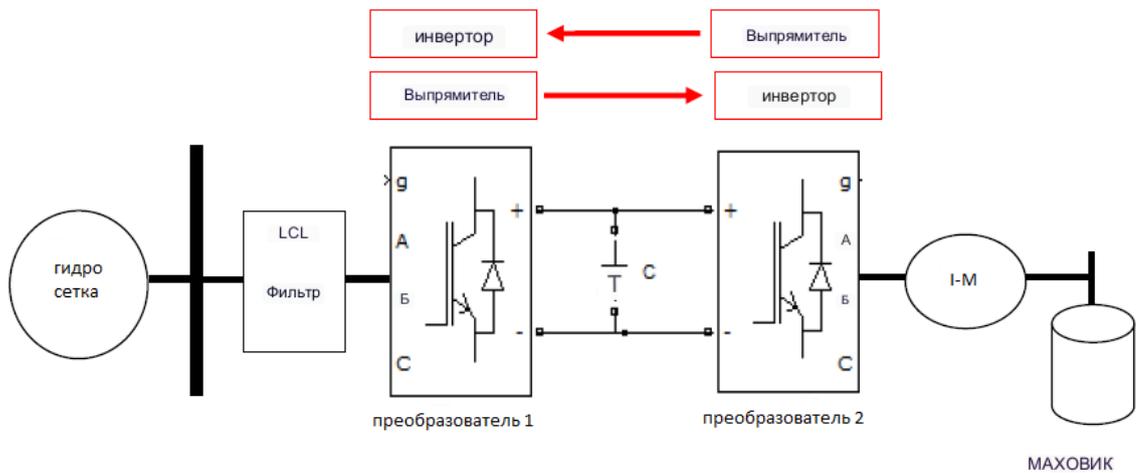


Рисунок 17- Принципиальная схема маховиковой системы накопления энергии

Стратегия управления:

Система накопления энергии с маховиком, состоит из следующих компонентов, которые были смоделированы в MATLAB/Simulink:

- два преобразователя напряжения
- индукционная машина
- маховик
- система контроля

Для упрощения моделирования и тестирования, она разбита на две подмодели. Каждая подмодель отдельно моделируется, тестируется и интегрируется, чтобы сделать это полной моделью.

Подмодели:

- модель управления, ориентированная на поле
- модель управления, ориентированная на напряжение

Показана однолинейная схема системы накопления энергии с маховиком (рисунок 18):

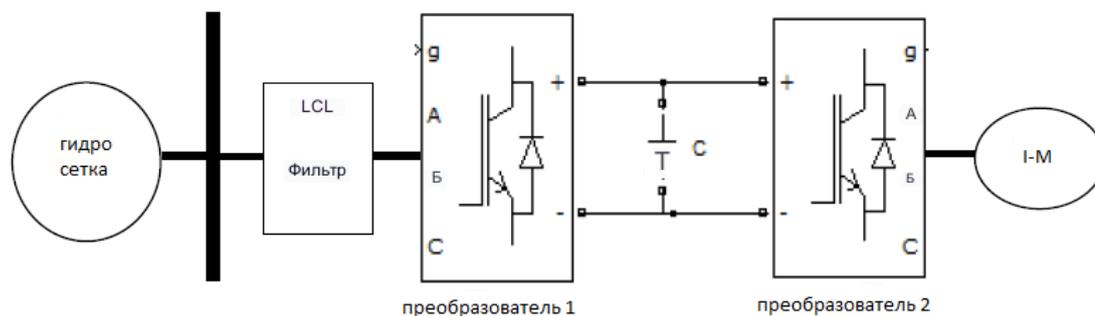


Рисунок 18 - Однолинейная схема системы накопления энергии с маховиком

Он имеет следующие подмодели:

Контроль ориентации поля.

- модель индукционной машины
- модель контроллера, ориентированного на поле
- конденсатор звена постоянного тока для регулирования напряжения

постоянного тока

- преобразователь напряжения

Показана схема привода управления, ориентированного на поле, который был смоделирован в симулинк (рисунок 19):

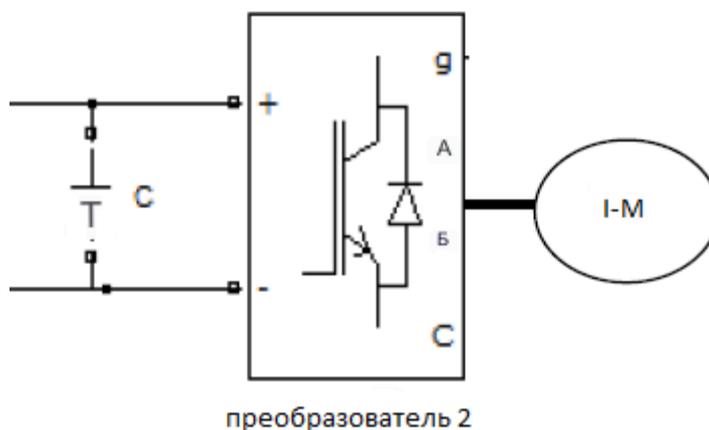


Рисунок 19 - Модель управления, ориентированного на поле

Производительность этой модели оказалась достаточной для целей контроля напряжения в месте соединения. Система управления соответствует требованиям и превосходит их, поскольку установлены по стандартам.

Управление по напряжению.

Это имеет следующие подмодели:

- 3-фазный источник питания переменного тока
- последовательный трансформатор и фильтры
- преобразователь напряжения

Схема управления, ориентированного на напряжение, которое было смоделировано в Simulink (рисунок 20):

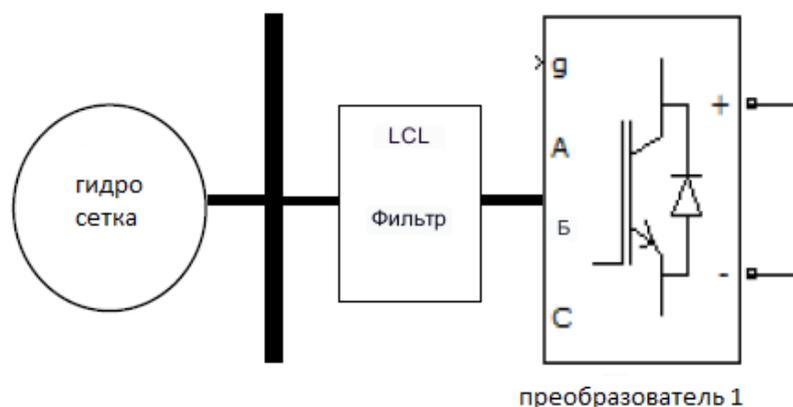


Рисунок 20 - Модель управления, ориентированного на напряжение

Вывод

В данной главе была рассмотрена схема, состоящая из системы накопления энергии, силового электронного интерфейса LCL-фильтр и трехфазного источника, представляющего собой электрическую сеть, как показано на (рисунок 17).

### 3.1 Основы системы хранения маховика

Маховик хранит кинетическую энергию во вращающейся массе. Энергия пропорциональна инерции  $J$  тела и квадрату угловой скорости вращения  $\Omega^2$ .

$$E = \frac{1}{2} \cdot j \cdot \Omega^2 \quad 11$$

Основные компоненты маховиковой системы накопления энергии (СЭЭ) можно увидеть на (рисунок 21). Электрическая машина (Е-машина) необходима для преобразования энергии. Это ускоряет ротор, когда маховик заряжается, преобразуя электрическую энергию в механическую. При разрядке машина работает как генератор, тормозя ротором и возвращает энергию в сеть. Электропитание и обратная связь по энергии реализованы инвертором мощности, обеспечивающим двунаправленный поток энергии. Поддержка ротора маховика может быть реализована либо механическими подшипниками, либо магнитными подшипниками, в зависимости от рабочей скорости. Маховики можно разделить на высокоскоростные (10000...100000 мин) и низкоскоростные (менее 6000 мин) [2]. Высокоскоростные маховики обычно имеют магнитную левитацию и работают в вакууме или частичном вакууме, чтобы уменьшить потери на трение. Поэтому вакуумный насос и управление магнитным подшипником в системе требуется. Характеристики низкоскоростных и высокоскоростных маховиков по сравнению с (таблица 3.1) [6].

Основные компоненты маховиковой системы накопления энергии СЭЭ (рисунок 21):

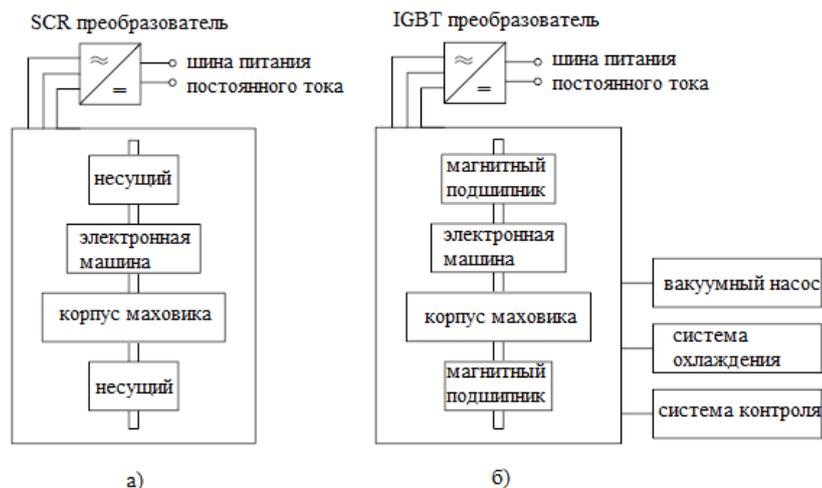


Рисунок 21 - Компоненты маховика: а) тихоходный маховик, б) высокоскоростной маховик. (SCR: кремниевый выпрямитель, IGBT: биполярный транзистор с изолированным затвором) [29]

Таблица 3.1 - характеристики низкоскоростных и высокоскоростных маховиков согласно [6].

	Низкоскоростные маховики	Высокоскоростные маховики
Материал ротора	Сталь	Композитные материалы
Электрическая машина	Асинхронная машина, машина с катушечным возбуждением, машина с постоянными магнитами, реактивная машина	Машина с постоянными магнитами, реактивная машина
Интеграция электронной машины и маховика	Отсутствие интеграции или частичная интеграция	Полная или частичная интеграция
Подшипники	Механический или смешанный (механический и магнитный)	Магнитный
Закрытая атмосфера	Низкий вакуум или легкий газ	Высокий или средний вакуум
Основное применение	Качество электроэнергии	Тяга и аэрокосмическая промышленность

- тихоходные маховики обычно имеют большую энергоемкость (1...десятки кВт·ч) и высокую номинальную мощность (в МВт). Одним из типичных применений является сеть электроснабжения для частоты и стабилизации напряжения. Ротор изготовлен из стали, что снижает трудоемкость изготовления и стоимость по сравнению с композитными материалами, армированными волокном. Из-за низкой скорости, требуется большая инерция массы ротора, что приводит к увеличению веса и размера системы. Но они не являются критическими проблемами для стационарных приложений. Низкая скорость также позволяет использовать механические подшипники. Для увеличения срока службы подшипников используются вспомогательные магнитные поддержки [4]. Низкоскоростные маховики могут работать как в обычном воздухе, так и в частичном вакууме или газе для зажигалок, чтобы уменьшить трение воздуха. Благодаря охлаждающему эффекту воздуха или газа на роторе, машины с катушечным возбуждением или асинхронные машины могут быть использованы вместо машин с постоянными магнитами (ПМ). В целом, несмотря на низкую удельную энергию (1 Втч/кг), низкоскоростные маховики позволяют получить недорогую, прочную и надежную конструкцию с простыми компонентами [4].

- высокоскоростные маховики обычно разрабатываются с целью получения высокой удельной энергии, удельная мощность (десятки кВт/кг). Энергоемкость обычно невелика (0,01...несколько кВтч). Они используются, как правило, для транспортных и аэрокосмических приложений, где требуются экстремальные ограничения веса и объема системы [5]. Как удельная энергия  $E/m$  (Втч/кг) корпуса маховика пропорциональна удельному материалу прочности (отношение прочности материала  $\sigma_u$  к массовой плотности  $\rho$ ) согласно (формула 12) [1], высокопрочные и легкие материалы, т.е. композитные материалы, армированные волокном (удельная прочность: 180...240 Втч/кг) предпочтительнее, чем металлы (удельная мощность: 12...66 Втч/кг) [1].

$$\frac{E}{M} \propto K \cdot \frac{\sigma_u}{\rho} \quad (12)$$

где,  $m$  — масса в кг;

$\sigma_u$  — предел прочности материала;

$\rho$  — масса плотности;

$K$  называется коэффициентом формы, в зависимости от геометрической конфигурации ротора и используемого критерия отказа типичные значения составляют 0,3...1.

Высокая скорость вращения делает невозможным использование обычных механических подшипников из-за больших потерь на трение. Ротор обычно левитирует на магнитных подшипниках, которые обычно более сложные и дорогие. Чтобы уменьшить огромные потери на аэродинамическое сопротивление, ротор находится в вакууме или частичном вакууме. Это вызывает трудности с нагревом ротора и рассеиванием. Поэтому машины с постоянными магнитами, которые имеют довольно низкие потери в роторе, применяются в высокоскоростных маховиках. Все эти «высокотехнологичные» компоненты (магнитная левитация, вакуум, высокоскоростная машина, двунаправленный инвертор потока мощности) и специальные материалы (композитные материалы, редкоземельные магниты) подталкивают высокоскоростные маховики к высокому ценовому уровню, что в 5 раз выше, чем у низкоскоростных маховиков [6] и высокой степенью сложности системы.

Поэтому они не получили широкого распространения по сравнению с существующими технологиями накопления энергии. (батареи, суперконденсаторы...), особенно в отношении опасности высокой скорости и возникновению системной ошибки. Потенциальные отказы могут возникнуть из-за трещины в массе ротора, в управлении магнитными подшипниками или

в силовых электронных системах. Защитная оболочка с подтвержденной безопасностью также увеличивает сложность и стоимость системы. Тем не менее, высокоскоростные маховики по-прежнему привлекательны на рынке накопителей энергии благодаря своим исключительным преимуществам высокой удельной мощности и удельной мощности, почти полному отсутствию износа и пригодности для чрезвычайно высокой цикличности при минимальном техническом обслуживании.

### Вывод

В главе 3.1 были рассмотрены основы системы хранения маховика, приведена (таблица 3.1) характеристики низкоскоростных и высокоскоростных маховиков согласно [6], в которой идет сравнение низкоскоростных и высокоскоростных маховиков касательно материалов их составляющих.

### 3.2 Характеристики маховика

Согласно [7] характеристики основных технологий накопления энергии суммированы и сопоставлены в (таблица 3.2). Маховики характеризуются высокой удельной мощностью (Вт/кг) и удельной мощностью (кВт/м<sup>3</sup>), высокой цикличностью без износа, низкими требованиями к техническому обслуживанию и низким воздействием на окружающую среду. Недостатками являются высокий саморазряд из-за внутренних потерь и более высокий риск безопасности, чем у других накопителей [8].

Таблица 3.2 - Характеристики технологий хранения электрической энергии [7].

-	Суперконденсаторы	Маховики	Свинцово - кислотная батарея	Литий – ионный аккумулятор
Удельная мощность (Вт/кг)	5.44 ... 100000	400 ... 30000	25 ... 415	8 ... 2000
Удельная энергия (Втч/кг)	0.07 ... 85.6	5 ... 200	10 ... 50	30 ... 300
Удельная мощность (кВт/м <sup>3</sup> )	15 ... 4500	40 ... 2000	10 ... 400	56.8 ... 800
Плотность энергии (кВт/м <sup>3</sup> )	1 ... 35	0.25 ... 424	25 ... 90	94 ... 500
КПД (%)	65 ... 99	70 ... 96	63 ... 90	70 ... 100
Срок службы (лет)	5 ... 20	15 ... 20	3 ... 20	2 ... 20
Срок службы (циклов)	10 <sup>4</sup> ... 10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup> ... 10 <sup>5</sup> 10 <sup>5</sup> ... 10 <sup>7</sup>	100 ... 2000	250 ... 10 <sup>5</sup>
Само-разряд (%/день)	0.46 ... 40	24 ... 100	0.033 ... 1.10	0.03 ... 0.33
Время перезарядки [9]	сек.... минут	< 15 минут	8 ч ... 16ч	Мин.... часы
Масштаб [МВт]	0 ... 5	0.001 ... 10	0 ... 50	0 ... 3
Техническая новизна	Проверенный, коммерциализирующийся	Старый, коммерциализирующийся	Очень старый, коммерциализирующийся	Очень старый, коммерциализирующийся
Воздействие на окружающую среду	Очень низкий	Очень низкий	Высокий	Высокий/средний

Маховики могут быстро заряжаться и разряжаться, передавая большое количество энергии за секунды с высоким КПД 85...95 % для высокоскоростных маховиков [7]. Мощность заряда и разряда маховиков не зависит от степени разрядки, в отличие от суперконденсаторов и аккумуляторов. А скорость разряда легко узнать, измерив, скорость вращения. Большое количество циклов не вызовет проблем с деградацией маховиков, для которых суперконденсаторы и аккумуляторы несопоставимы, так как их обычно приходится заменять через 10...15 лет из-за деградации. Таким образом, преимущество маховиков можно увидеть в длительном сроке службы. Однако высокий саморазряд является критическим недостатком маховиков, что определяет их непригодность для долговременного хранения энергии, как батареи. Но этот недостаток мало влияет, когда время хранения уменьшается до секунд, так как потери пренебрежимо малы по сравнению с полной преобразованной энергией. Потенциальный риск безопасности, связанный с высокой скоростью вращения массы, также является критическим недостатком маховиков. Это тянет маховики вниз, учитывая применение в мобильности, например автомобилей и поездов.

#### Вывод

В данной главе были представлены и рассмотрены характеристики маховиков.

Была представлена (таблица 3.2) с характеристиками технологий хранения электрической энергии в таких накопителях, как: суперконденсаторы, маховики, Свинцово - кислотная батарея, Литий – ионный аккумулятор.

#### **3.2.1 Применение маховиков**

Благодаря высокой удельной мощности и высокому саморазряду маховики подходят для краткосрочного хранения, когда требуется очень

частая зарядка/разрядка с высоким уровнем мощности, поэтому энергетические потери незначительны по сравнению с преобразованной энергией. В Таблице 3.3 приведены типичные промышленные применения маховиков, имеющих в продаже. Эти приложения включают в себя как большие масштабы в сети, так и малые масштабы на стороне клиента. Обычно высокая мощность и производительность достигаются за счет расположения маховиков в рядах, а не за счет использования больших машин в одном модуле [8].

Таблица 3.3 - типичные промышленные применения [14] имеющихся в продаже маховиков.

Приложение	Функциональность	Рекомендации
Системы питания	Интеграция возобновляемых источников питания	[8, 10]
	Стабилизация частоты и напряжения	
	Качество электроэнергии и регулирование	
	Сглаживание напряжения и мощности	
	Источник бесперебойного питания (ИБП)	
Мобильность (автомобили, железная дорога)	Рекуперация энергии торможения	[11, 12]
Система запуска самолетов, корабли, кран, лаборатории	Импульсный источник питания	[13]
Аэрокосмическая промышленность	Спутниковое управление ориентацией, резервное хранение энергии	[14]

Они могут быть сгруппированы в обычный тип и интегрированный тип. Большинство существующих систем маховиков [18] имеют конфигурации (рисунок 22):

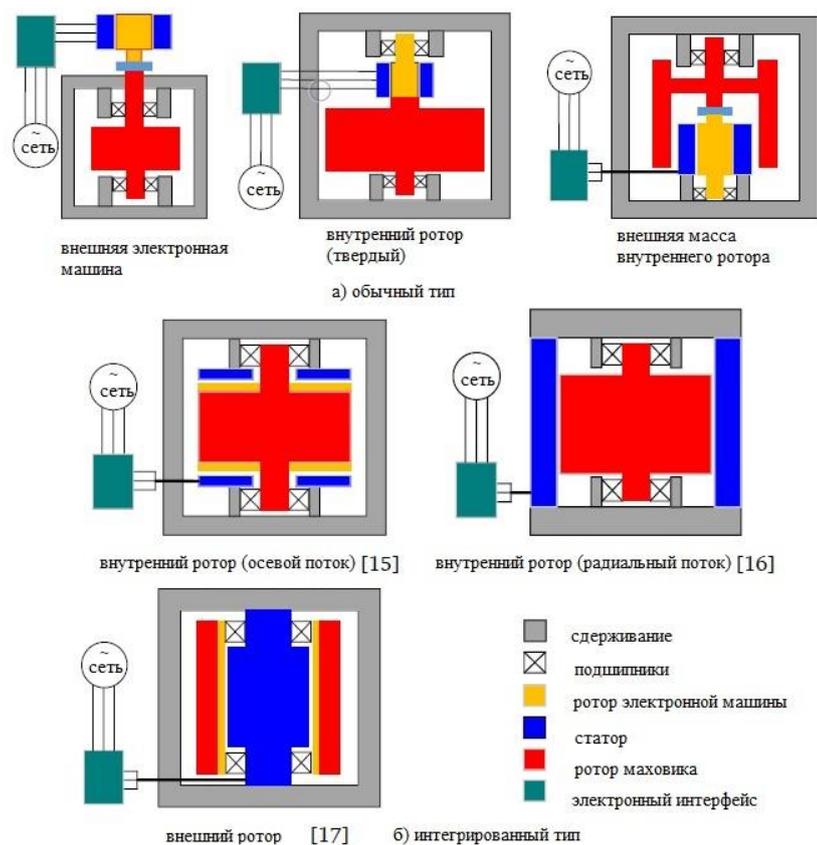


Рисунок 22 - Типовые конфигурации систем маховиков [18]

Для обычного типа (рисунок 22) [18].

Ротор маховика и Е-машина разделены агрегаты и соединены механической муфтой или на одном валу. Машина может быть размещены внутри или снаружи корпуса. Внешняя машина имеет хорошие условия охлаждения, так что можно использовать высокомошную и недорогую асинхронную машину. Но скорость обычно низкая из-за механических проблем компонентов муфты и проблем с уплотнением. Ротор-маховик может быть цельным или цилиндрическим (так называемый тип внутреннего ротора с внешней массой). Последний тип представляет собой обычно используемую топологию для композитного обода ротора, соединяющегося с валом с помощью легкой втулки, где можно эффективно использовать пространство внутри обода, что приводит к компактной конструкции. А вот для стального ротора этот тип не подходит из-за высокой плотности и

относительно низкой прочности материала. Стали больше подходят для изготовления цельного ротора.

Для интегрированного типа (рисунок 22) [18].

Ротор маховика также действует как часть пути потока электронной машины, таким образом, компонент накопления энергии и блок питания интегрированы. Машина может быть обычного типа с радиальным потоком или нового типа с осевым потоком [15]. Тип осевого потока может использовать значительную осевую силу, которая контролируется дополнительной катушкой в обмотке статора, для противодействия силе тяжести ротора, уменьшая нагрузку и трение в подшипниках. Но для этого требуется сложная стратегия управления, как силой, так и крутящим моментом. В радиальном магнитном потоке машина с ПМ не применима из-за низкой механической прочности магнитов. Машина представляет собой либо машину сопротивления, либо униполярную машину, которая имеет более низкую удельную мощность, чем машина с постоянными магнитами.

По сравнению с конфигурацией внутреннего ротора, тип внешнего ротора имеет более высокую степень интеграции. Композитный обод ротора может полностью левитировать с помощью магнитных подшипников внешнего ротора без какого-либо соединения со ступицей, получая еще более высокую удельную энергию и плотность энергии. Интегрированная конфигурация увеличивает зависимость между каждым компонентом. Самостоятельный компонентный дизайн уже не актуален, поэтому требуются большие затраты на разработку, что можно расценивать как недостаток.

Традиционные механические подшипники по-прежнему являются самыми простыми и наиболее широко используемыми решениями для низкоскоростных маховиков. Но они страдают от сильного износа на высокой скорости и требуют хорошей смазки и периодического обслуживания. Керамические подшипники и гибридные подшипники могут использоваться для увеличения срока службы подшипников благодаря их низкому коэффициенту трения и высокой стойкости к износу. Для систем

высокоскоростных маховиков, где износ или техническое обслуживание являются критическими проблемами, требуются бесконтактные магнитные подшипники (МВ). Они подразделяются на пассивные магнитные подшипники (ПМБ) и активные магнитные подшипники (АМП). РМВ используют неконтролируемую силу, создаваемую постоянными магнитами, чтобы поддерживать весь или часть веса ротора. С точки зрения АМВ, усилие можно контролировать в зависимости от положения и движения ротора. Тем не менее, магнитные подшипники также производят потери, которые иногда сравнимы с механическими подшипниками. Паразитные потери механических и магнитных подшипников обычно составляют 1...5 % запасенной энергии в час [20]. Потери в подшипниках вызывают саморазряд маховика. Низкие потери в подшипниках достигаются за счет использования подшипников из высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). Потери могут быть снижены до 0,1 % запасенной энергии в час, включая потери системы охлаждения. Однако стоимость подшипников HTS пока невелика для промышленного применения.

Высокоскоростные маховики обычно располагаются в вакуумном контейнере, в котором уровень вакуума колеблется от сотен паскалей до  $10^{-4}$  Па. Еще одна функция сдерживания для обеспечения безопасности в случае отказа ротора. Когда ротор разваливается, защитная оболочка должна препятствовать вылету снарядов и рассеивать кинетическую энергию за счет деформации. Однако, к сожалению, механизм воздействия и поведение вовлеченных тел достаточно сложно предсказать. Экспериментальные исследования необходимо проводить для маховиков, предназначенных для производства [1]. Эксперимент по наблюдению за поведением при ударе был проведен в [25] с целью проверки и улучшения конструкции защитной оболочки. Некоторые практические рекомендации по безопасной конструкции маховиков предложены в [26].

Мотивация и план этой работы.

Чтобы решить, выгодно ли применять маховик в системе, необходимо дать всестороннюю оценку преимуществ и инвестиций. Преимущества различаются для разных приложений. В этой диссертации в качестве исследуемых приложений выбраны две системы: бытовая фотоэлектрическая (PV) система и система питания трамвая. В первом случае маховик может накапливать избыточную генерацию PV и сохранять ее для использования в ночное время. В трамвайной системе маховик может накапливать рекуперативную энергию при торможении трамвая. В обеих системах энергетический и экономический потенциал экономии является основным преимуществом и, как правило, также первым соображением для клиента при выборе надлежащих устройств хранения и их оптимальных характеристик. Таким образом, первая цель этой диссертации состоит в том, чтобы предоставить методологию оценки энергетических характеристик таких систем, оснащенных маховиками, чтобы обеспечить основу для оценки следующего шага (например, затрат) и проектирования.

### **3.3 Анализ потока мощности жилых фотоэлектрических систем с маховиками**

Устройства накопления энергии в бытовых фотоэлектрических системах могут устранить несоответствие времени выработки и потребления электроэнергии путем накопления избыточной энергии и сохранения ее для последующего использования, когда это необходимо. Таким образом, потребление электроэнергии из сети может быть снижено за счет увеличения собственного потребления фотоэлектрической генерации. В настоящее время на рынке систем накопления энергии для бытовых фотоэлектрических установок доминируют исключительно аккумуляторы со значительной тенденцией перехода от свинцово-кислотных (LA) аккумуляторов к литий-ионным (Li-ion) аккумуляторам. По сравнению с батареями маховики имеют более длительный срок службы (циклы) без проблем с деградацией и незначительным воздействием на окружающую среду. В 1970-х годах уже предлагалась идея использования маховиков в бытовых фотоэлектрических системах, хотя до этого было установлено, что обычные маховики ни технически, ни экономически не могут конкурировать с батареями. Но, согласно, если маховик спроектирован со встроенными функциями преобразования мощности постоянного тока в переменный и отслеживания точки максимальной мощности (MPPT), маховик будет технически и экономически конкурентоспособным с системой на основе батареи: батарея плюс инвертор и MPPT. На основе этой идеи был построен прототип маховика, который имеет накопительную емкость 4 кВтч и мощность 500 Вт. Ротор, который находится на магнитной подушке, имеет максимальную скорость вращения  $15000 \text{ минут}^{-1}$  и работает в вакууме. Экспериментальные измерения показывают, что общая энергоэффективность системы на основе маховика, включая силовую электронику, составляет 68 % (с потерей запасенной энергии примерно 1,5 % в час), что немного выше, чем у системы на основе батареи со значением 65 % (учитывая 80 % для батареи,

85 % для инвертора, 96 % для МРРТ). Это сравнение не корректно на сегодняшний день, так как КПД и производительность аккумуляторов значительно возросли, т.е. до 85...95 % для литий-ионных аккумуляторов. Во-вторых, измеренный КПД фокусируется на эффективности преобразования мощности прототипа, а не на циклическом режиме в фотоэлектрической системе, где критическими становятся потери на холостом ходу в маховике, а не потери на преобразование энергии в течение периода цикла в часах.

Поэтому в этой главе будет представлена оценка производительности маховика в бытовой фотоэлектрической системе. Акцент остается на общей энергоэффективности маховика с учетом рабочего цикла и потенциале энергосбережения фотоэлектрической системы в масштабе одного года. Цель состоит в том, чтобы дать количественную оценку, чтобы указать на проблемы, сдерживающие использование маховиков, и намеки на технические усовершенствования маховиков для использования в долгосрочном хранении в будущем.

### **3.3.1 Стратегия работы системы**

Исследуемая бытовая фотоэлектрическая система предназначена для максимизации собственного потребления электроэнергии.

Основные компоненты бытовой фотоэлектрической системы с FESS показаны на (рисунок 23): Система фотоэлектрической генерации («PV»), бытовое потребление («Нагрузка»), система хранения («FESS») и сеть «Grid», которая также может снабжать домохозяйство электроэнергией, как получить избыточную энергию от фотоэлектрической системы. На основе разного поколения и потребления, существуют различные условия потока мощности между компонентами в системах. Их можно разделить на два режима работы.

Режим доминирующей [18] генерации (режим А) и режим

доминирующего потребления (режим В) (рисунок 23):

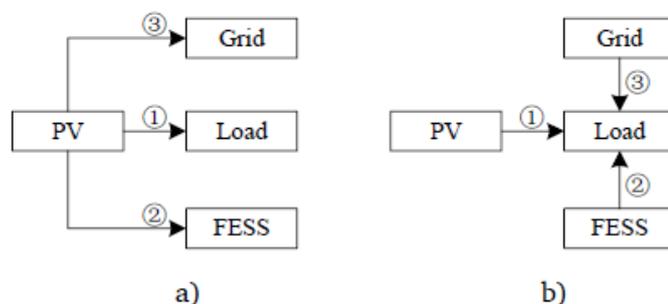


Рис. 23 - Режимы работы фотоэлектрической системы: а) Режим А: доминирующая генерация, б) Режим В: потребление доминирующий. (Цифры показывают приоритет потока мощности от 1 до 3 в порядке убывания) [18]

Режим А имеет место, когда генерация PV выше, чем потребление:  $P_{PV} \geq P_L$  ( $P_{PV}$ : Мощность фотоэлектрической генерации,  $P_{PV} \geq 0$ ;  $P_L$ : мощность нагрузки,  $P_L \geq 0$ ). Поколение PV соответствует нагрузке в первую очередь и запасает избыточную энергию в FESS. После того, как FESS полностью заряжен или достигнут предел мощности зарядки, остаточная генерация будет поступать в сетки.

Если  $P_{PV} < P_L$ , система работает в режиме В. Потребление осуществляется различными источников в соответствии с приоритетом. Во-первых, вся фотоэлектрическая генерация используется для выполнения нагрузки. Затем FESS разряжается, чтобы покрыть оставшуюся нагрузку. Если FESS пуст или остаточная потребность в мощности превышает номинальную мощность FESS, покупается дополнительная энергия из сетки.

Определив выходную мощность FESS как  $P_{FW}$  ( $P_{FW} > 0$  для разряда;  $P_{FW} < 0$  для заряда) и потребляемой мощности из сети как  $P_g$  ( $P_g > 0$  для потребления;  $P_g < 0$  для подачи в сеть) энергетический баланс системы можно представить в виде следующего выражения.

$$P_{PV} + P_{FW} + P_g = P_L \quad (13)$$

При моделировании входными данными являются  $P_{PV}$  и  $P_L$ .  $P_{FW}$ .  $P_g$  можно получить согласно (формула 13). Таким образом, определяется поток мощности системы для оценки следующего шага.

Для количественной оценки результатов моделирования используются два абсолютных показателя. Первый, рассчитанный по (формула 14) – это экономия электроэнергии от сети ( $E_{save}$ ). В сравнении с голым домохозяйством с тем же профилем нагрузки, но без какой-либо фотоэлектрической системы или хранилища. Другой – это энергия, подаваемая в сеть ( $E_{feed\ in}$ ), определяемая (формул 14). Верхний индекс «+» обозначает положительное значение, а «-» — отрицательное значение.

$$E_{save} = \Sigma(P_L - P_g^+) \cdot \Delta t, \quad (14)$$

$$E_{feed\ in} = \Sigma(P_g^-) \cdot \Delta t. \quad (15)$$

Помимо этих двух абсолютных показателей, обычно используются три относительных показателя: введены: самодостаточность  $\xi$ , саморасход  $\gamma$  и энергоэффективность маховика  $\eta$ , рассчитываемый по (формула 16 ... 18). Следует отметить, что энергоэффективность  $\eta$  здесь определяется суммой энергии (в кВт·ч), отдаваемой от маховика к один попал в маховик. Это отличается от нормальной определенной эффективности в отношении мощность и потери в ваттах. Чтобы пояснить это, они названы по энергоэффективности. и энергоэффективность соответственно в этом тезисе.

$$\xi = 1 - \frac{\sum P_g^+ \cdot \Delta t}{\sum P_L \cdot \Delta t}, \quad (16)$$

$$\gamma = 1 - \frac{\sum P_g^- \cdot \Delta t}{\sum P_{PV} \cdot \Delta t}, \quad (17)$$

$$\eta = 1 - \frac{\sum P_{FW}^+ \cdot \Delta t}{\sum P_{FW} \cdot \Delta t}. \quad (18)$$

### Вывод

В данной главе было рассмотрено применение маховиков, так же представлена (таблица 3.3) где было типичные промышленные применения имеющихся в продаже маховиков.

Представлен (рисунок 23) где показано большинство существующих систем маховиков с имеющейся конфигурацией.

## Заключение

В связи с возросшим спросом на энергию и ростом затрат на энергию в последние годы устройства накопления энергии играют важную роль в отрасли с целью более эффективного использования энергии за счет компенсации несоответствия стороны генерации и стороны потребления. Маховики — это накопители кинетической энергии, которые хранят энергию во вращающейся массе. Чтобы решить, выгодно ли применять маховик в системе, необходимо дать всестороннюю оценку выгод и инвестиций. В большинстве систем энергосберегающие и экономические возможности являются основными преимуществами и, как правило, также первыми соображениями для клиента при выборе подходящих устройств хранения данных и их оптимальных характеристик. Таким образом, первая цель этой диссертации состоит в том, чтобы предоставить методологию оценки энергетических характеристик систем, оснащенных маховиками, чтобы обеспечить основу для оценки следующего шага (например, затрат) и проектирования.

Вторая цель этой работы состоит в том, чтобы предоставить подход к проектированию системы маховика путем создания прототипа демонстрационного образца маховика, выделив важные аспекты в основных компонентах на этапе проектирования. Этот демонстратор предназначен для проверки анализа энергетических характеристик и реализации ключевых технологий, таких как конструкция стального ротора, высокоскоростная машина, магнитная левитация и конструкция системы.

Таким образом, потребление электроэнергии из сети может быть снижено за счет увеличения собственного потребления фотоэлектрической генерации. В настоящее время на рынке систем накопления энергии для бытовых фотоэлектрических установок доминируют исключительно аккумуляторы со значительной тенденцией перехода от свинцово-кислотных (LA) аккумуляторов к литий-ионным (Li-ion) аккумуляторам.

## Список используемых источников

1. Алексеев Б.А. Применение накопителей энергии в энергетике // Электро, № 1, 2020. С. 42-46.
2. Аносов В.Н. Методы и средства повышения эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств: Дисс...докт. техн. наук. Новосибирск. 2009. 252 с.
3. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия. Ленинградское отд-ние, 2020. 256 с.
4. Вайнштейн Р.А., Пономарев Е.А., Наумов В.А., Разумов Р.В. Основы противоаварийной автоматики в электроэнергетических системах. Чебоксары: Издательство РИЦ "СРЗАУ", 2019. 182 с.
5. Воронин, П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение/ П.А. Воронин. - М.:Издательский дом "Додека-XXI", 2018. – 384 с.
6. Дьяков А.Ф., Кучеров Ю.Н., Вагнер А.А., Бондаренко А.Ф., Глушкин И.З., Хвощинская З.Г., Лабунец И.А., Сокур П.В., Шакарян Ю.Г. О применении асинхронизированных турбогенераторов в энергосистемах России. // Электронный журнал «Новое в российской электроэнергетике» РАО ЕЭС России, № 7, 2017.
7. Зеленохат Н.И. Повышение динамической устойчивости энергосистемы с помощью электрического торможения генераторов. // Электро, № 4, 2020. С. 11-14.
8. Зеленохат Н.И., Баргути Х.С., Ба Т.С., Негаш Г.А. Стабилизация режима энергосистемы с помощью управляемого электрического торможения // Известия РАН, № 6, 2018.
9. Ковалев Г.Ф. Методика оценки системной эффективности накопителей энергии с учетом фактора надежности. // Системные оценки эффективности и выбор направлений технического прогресса в энергетике, 1990. С. 122-132.

10. Лабунец И.А., Сокур П.В., Пинчук Н.Д., Кади-Оглы И.А., Логинов А.Г., Фадеев А.В., Зинаков В.Е., Чернышев Е.В., Шейко П.А. Асинхронизированные турбогенераторы как средство повышения устойчивости и регулирования напряжения в электрических сетях. // Электрические станции, № 8, 2016.

11. Мусави С.М., Фараджи Ф., Маджази А. и др., «Всесторонний обзор технологии системы накопления энергии с маховиком», Обзоры возобновляемых и устойчивых источников энергии, том. 67, январь, стр. 477-490, 2017.

12. Новиков Н.Л., Новиков А.Н. Молодежная секция РНК СИГРЭ // Перспективы применения накопителей энергии и интеллектуальных систем управления для распределенной генерации, включающей возобновляемые источники энергии. Новосибирск. 2017.

13. Носков В.Н. Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии в энергоустановках железнодорожного транспорта: Дисс...канд. техн. наук. Ростов-на-Дону. 2010. 209 с.

14. Пентегов И. В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. Киев: Наукова Думка, 2018.

15. Пенья-Альзола Р., Себастьян Р., Кесада Дж. и др., «Обзор систем накопления энергии на основе маховика», Международная конференция по энергетике, энергетике и электроприводу, Малага, Испания, 2020 г., стр. 589-594.

16. Плейтер Б.Б., Эндрюс Дж.А. Достижения в области систем накопления энергии маховика. PowerPulse.Net [электронный ресурс]. URL: <http://www.darnell.com/NewsServices/PowerPulse/> (дата обращения 01.03.2023).

17. Прядилов А.В., Барбаков П.П., Киряков Д.М. Система заряда емкостного накопителя, работающего в режиме с полным разрядом // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов. IV Всероссийская научно-техническая конференция студентов,

магистрантов, аспирантов: сборник трудов. Ответственный за выпуск: В.В. Вахнина. 2016. С. 370-372.

18. Прядилов А.В., Барбаков П.П., Киряков Д.М. Схемотехнические решения устройств заряда конденсаторов большой емкости // «Студенческие Дни науки в ТГУ» научно-практическая конференция (Тольятти, 1-25 апреля 2016 года) : сборник студенческих работ / отв. за вып. С.Х.Петерайтис. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. С.119-120

19. РФ. Росстандарт. УДК 621.316.7:338.012. Кононенко В.Ю., Смоленцев Д.О., Вещунов О.В. Возможности использования сетевых накопителей энергии и их эффективность: учебно-методическое пособие. Издательство ФГБУН: Москва, 2014.

20. Сабихуддин С., Кипракис Э.А., Мюллер М. «Численный и графический обзор технологий хранения энергии», *Energies*, vol. 8, нет. 1, стр. 172-216, 2018.

21. Струбхар Дж.Л., Томпсон Р.К., Пак Т.Т. и др., «Легкая защитная оболочка для высокоэнергетических вращающихся машин», *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, нет. 1, стр. 378-383, 2017.

22. Тимофеева К.М., Чекаловец Л.Н. Анализ и корректировка действия системы регулирования К-300-240, оборудованной электроприставкой при переходных процессах в энергосистеме // В кн.: Опыт эксплуатации релейной защиты и электроавтоматики в энергосистемах. М.: Энергия, 2017.

23. Филипчик Ю.Д. Оценка эффективности импульсной разгрузки турбин энергоблоков АЭС для повышения динамической устойчивости. учебно-методическое пособие., 2012. С. 40-43.

24. Фролов Н.В. Методы диагностики накопителей энергии [электронный ресурс]. URL: [https://pedrazvitie.ru/servisy/publikaciya\\_materiala\\_na\\_saite/material?id=2925](https://pedrazvitie.ru/servisy/publikaciya_materiala_na_saite/material?id=2925) (дата обращения 21.03.2023).

25. Фролов Н.В. Методы диагностики накопителей энергии [электронный ресурс]. URL: [https://pedrazvitie.ru/servisy/publikaciya\\_materiala\\_na\\_saite/material?id=3047](https://pedrazvitie.ru/servisy/publikaciya_materiala_na_saite/material?id=3047) (дата обращения 24.05.2023).

26. Фролов Н.В. Методы диагностики накопителей энергии [электронный ресурс]. URL: [https://pedrazvitie.ru/servisy/publikaciya\\_materiala\\_na\\_saite/material?id=3048](https://pedrazvitie.ru/servisy/publikaciya_materiala_na_saite/material?id=3048) (дата обращения 24.05.2023).

27. Amiryar M.E., Pullen C.R. "Overview of technologies for flywheel energy storage systems and their applications", Applied Sciences, vol. 7, no. 3, p. 286, 2017.

28. Bender D. Recommended Practices for the Safe Design and Operation of Flywheels, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM; Livermore, California, USA, Report: SAND2015-10759, December 2018.

29. Genta G., Kinetic Energy Accumulator: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems 1st. ed. London, UK and Boston, USA: Butterworths, 2018.

30. Khan A. Progress in Natural Science - Materials International [электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100200710800381X#fig1> (дата обращения 01.03.2023).

31. McKay D. Wind Farm Performance in the United Kingdom and Denmark, University of Cambridge and Department of Energy and Climate Change 2013.

32. Nguyen T.D., Tseng K., Zhang S., et al., "A New Axial Flux Permanent Magnet Machine for a Flywheel Energy Storage System: Design and Analysis", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 9, pp. 3784-3794, 2019.

33. Strasik M., Johnson P.E., Day A.S., et al., "Design, Fabrication, and Testing of a 5 kWh/100 kW Flywheel Energy Storage Unit Using a High

Temperature Superconducting Bearing", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 17, no. 2, pp. 2133-2137, 2017.