



**Некоммерческое партнерство
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ
Единой энергетической системы»**

111 250, Москва, проезд Завода Серп и Молот,
дом 10, офис 608, Тел. (495) +7 495 012 60 07
E-mail: dtv@nts-ees.ru, <http://www.nts-ees.ru/>
ИНН 7717150757

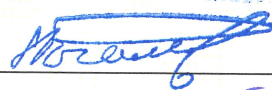


Основана в 1724 году

Российская Академия Наук
Секция по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по
системным исследованиям в энергетике

УТВЕРЖДАЮ

Президент, Председатель
Научно-технической коллегии,
д.т.н., профессор



«15» ноября 2023 г. Н.Д. Рогалев

ПРОТОКОЛ № 10

совместного заседания Секций «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» и «Возобновляемая
энергетика и гибридные энергетические комплексы» НП «НТС ЕЭС»,
Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным
исследованиям в энергетике

31 октября 2023 года

г. Москва

Присутствовали: члены секций «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», «Возобновляемая
энергетика и гибридные энергетические комплексы» НП «НТС ЕЭС», НИК С6
РНК СИГРЭ, ФГБУН «ИНЭИ РАН», ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», АО «НТЦ ФСК
ЕЭС», Комитет ВИЭ РосСНИО, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный
университет», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет (НЭТИ)», ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е.
Алексеева», ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ФГБОУ ВО
«Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева», АНО «НИЦ
Атмограф», ООО «РТСофт-СГ», всего **61** человек.

Со вступительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. Илюшин П.В.

Во вступительном слове было отмечено, что решение задачи управления параметрами переходных процессов в условиях существенного роста количества и суммарной мощности объектов ВИЭ в структуре генерирующих мощностей энергосистем и изолированных энергорайонов крайне актуально в современных условиях. Практически мгновенный в первом приближении отклик объектов ВИЭ инверторного включения, из-за отсутствия механической инерции, на аварийные возмущения приводит к увеличению скорости протекания переходных процессов, что вызывает отключения традиционных синхронных генераторов и электроприемников потребителей, чувствительных к таким отклонениям. В ряде случаев эти аварии заканчиваются полным погашением изолированных энергорайонов. Быстродействие традиционных устройств релейной защиты, противоаварийной и режимной автоматики в этом случае оказывается недостаточным. Повысить их быстродействие технически сложно, а практически невозможно, так как это требует их полной замены. Поэтому, обоснован переход к новой идеологии управления объектами ВИЭ, при которой инверторный преобразователь становится вместо «ведомого сетью» – «ведущим», что позволяет реализовать целый ряд системных функций.

С докладом **«Развитие концепции управления сетевыми инверторами объектов распределенной генерации в режиме «ведущий»»** выступил Суворов Алексей Александрович, к.т.н., доцент Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Основные положения доклада приведены ниже. Презентация доклада прилагается (**Приложение 1**).

1. Представлен анализ современных темпов внедрения объектов генерации на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в Единой энергетической системе (ЕЭС) России и в мире в целом. Отмечено, что 2022 год стал рекордным: по итогам года введены почти 340 ГВт ВИЭ-генерации, что увеличило глобальную совокупную установленную мощность объектов ВИЭ до 3,3 ТВт. Наибольший вклад внесли объекты солнечной и ветровой генерации. Среди стран безоговорочным лидером по установленной мощности ВИЭ-генерации является Китай, с более чем 1 ТВт установленной мощности. Применительно к России по состоянию на июль 2023 г. совокупная установленная мощность объектов ВИЭ преодолела порог в 6,0 ГВт.

2. Отмечено, что 5,87 ГВт мощности составляют объекты ВИЭ в России, которые работают параллельно с централизованной сетью. Несмотря на незначительную долю возобновляемой генерации в целом в ЕЭС России, уже сегодня в отдельных региональных энергосистемах доля выработки ВИЭ превышает 10–15%, что оказывает влияние на работу электроэнергетических систем (ЭЭС). Кроме этого, отмечено, что известная территориальная специфика нашей страны обуславливает особый характер построения отечественных энергосистем, согласно которому на зоны изолированного энергоснабжения приходится почти 65% территории страны.

3. Одним из перспективных направлений развития изолированных энергосистем является строительство объектов ВИЭ, в сочетании с системами накопления электроэнергии (СНЭЭ), при котором применяются сетевые инверторы (СИ) для их подключения к сети. В результате это приводит к тому, что свойства и возможности объектов ВИЭ и СНЭЭ существенно зависят от динамики функционирования СИ. Однако в результате «развязки» на постоянном токе объекта ВИЭ и основной электрической сети, объекты ВИЭ и СНЭЭ в их классическом понимании не оказывают вклада в формирование общей инерции энергосистем. Таким образом для современных энергосистем свойственно снижение общей постоянной инерции. Так же отмечено, что данная особенность более сложная, так как в действительности инерция становится непостоянной во времени и изменяется в довольно широких пределах. Это зависит от доли объектов ВИЭ в каждый конкретный момент времени.

4. Выделена ещё одна особенность современных энергосистем, заключающаяся в изменении коэффициента отношения короткого замыкания (ОКЗ), который характеризует плотность электрической сети. В зависимости от величины ОКЗ выделяют сильные и слабые сети. Однако в современных реалиях изменение ОКЗ происходит постоянно, по разным причинам. В итоге это приводит к различным негативным последствиям, включая возникновение незатухающих колебаний различной частоты. В качестве основных факторов выделяют настройки быстродействующих контуров системы автоматического управления (САУ) СИ и изменение ОКЗ сети. Анализ опыта эксплуатации энергосистем, с учетом этапов их трансформации, показывает, что традиционные САУ СИ оказываются не готовыми к происходящим изменениям, по причине того, что подразумевается работа СИ в режиме ведомого сетью. При этом СИ выступает в качестве источника тока и синхронизируется с сетью с помощью блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

5. Учитывая рассмотренные в докладе проблемы и последствия, к которым они приводят, была предложена новая парадигма управления СИ. В рамках новой парадигмы СИ работает в режиме ведущего. САУ СИ формирует опорные

напряжения и фазу для широтно-импульсной модуляции (ШИМ). За счёт этого появляется возможность регулировать частоту, напряжение сети, вносить вклад в инерционный отклик, также реализовывать другие функции. В рамках концепции ведущего выделено три основных подхода: управление на основе статизма, виртуальный осциллятор и виртуальный синхронный генератор (ВСГ). Одним из наиболее перспективных и многообещающих подходов является последний. Идея заключается в имитации свойств и возможностей традиционного синхронного генератора (СГ). На основе концепции ВСГ в СИ можно реализовать все функции, которые выполняет СГ. Концепция ВСГ применима ко всем первичным источникам энергии: ветроэнергетические (ВЭУ) и фотоэлектрические установки (ФЭУ), различные типы СНЭЭ, линии (ЛПТ) и вставки постоянного тока (ВПТ), зарядные станции для электромобилей.

6. Представлены результаты исследований, которые демонстрируют преимущества ВСГ в изолированных ЭЭС. Сравнения выполнялись с модифицированными алгоритмами статизма. Первое сравнение – это реакция на отклонения частоты, которые в таких энергосистемах, в силу их специфики, являются неизбежными. Статизм приводит к гораздо большей амплитуде колебаний и их длительности, при этом фиксируется большая скорость изменения частоты. Использование ВСГ позволяет за счёт СИ компенсировать отклонения и тем самым сохранить моторесурс дизель-генераторных установок (ДГУ), обеспечив работу на оптимальных оборотах. Второй эксперимент связан с увеличением объектов ВИЭ с целью замещения ДГУ для экономии топлива. Использование статизма приводит к нарушению устойчивости при росте мощности объектов ВИЭ и уменьшению плотности сети, в отличие от ВСГ. Таким образом, реализация концепции ВСГ позволяет увеличить мощность объектов ВИЭ в структуре генерирующих мощностей, что является одной из актуальных проблем для Крайнего Севера и Дальнего Востока страны.

7. Представлены различные реализации концепции ВСГ, которые отличаются внутренними, внешними контурами управления и уровнем детализации модели. Среди множества реализаций ВСГ были выделены структуры: VISMA, синхроконвертор, ВСГ каскадного типа и др. Данным реализациям характерны основные свойства и возможности, разработанные в рамках концепции ВСГ. Другие менее распространенные структуры являются их составными частями или имеют аналогичную динамику функционирования. Все эти модели были реализованы в тестовой схеме и проведены их всесторонние исследования. Сделан вывод, что модели ВСГ, управляемые по напряжению (ВСГ-Н), оказались наиболее надежными и эффективными среди всех остальных. Отсутствие виртуального сопротивления в таких моделях приводит к самой быстрой скорости отклика при любых возмущениях. Однако это приводит

к постоянному перерегулированию и большому отклонению частоты. Добавление виртуального сопротивления в любой форме приводит к лучшему инерционному отклику и регулированию частоты. Поэтому, оптимальной структурой системы управления на основе ВСГ можно назвать модель, управляемую по напряжению с моделью СГ второго порядка. Установлено, что данной структуре присуща принципиальная проблема взаимовлияния контуров управления активной и реактивной мощностями, последствиями которой являются ухудшение всех динамических характеристик: быстроедействие, демпфирование, снижение областей устойчивости, вплоть до возникновения незатухающих колебаний и нарушения устойчивости функционирования СИ.

8. Учитывая указанную принципиальную проблему, которая свойственна всем современным структурам ВСГ-Н, была разработана альтернативная структура, управляемая опорным сигналом тока (ВСГ-Т). Её особенность заключается в параллельной работе контуров, позволяющих практически исключить взаимовлияние мощностей. Демпфирование осуществляется за счёт демпферной обмотки, что позволяет повысить скорость реакции ВСГ. Анализ модели в пространстве состояний показал, что алгоритм функционирует устойчиво при любом значении ОКЗ. С помощью предложенного весового коэффициента K_{pq} доказана минимизация взаимовлияния мощностей в сравнении с традиционной ВСГ-Н. Данный вывод подтверждён нелинейным динамическим моделированием. Ещё одной особенностью разработанного алгоритма управления является его гибкая структура. Предложенная технология ВСГ-Т позволяет устанавливать регуляторы скорости и напряжения на внутренний и внешний уровень для лучшей производительности.

9. Для структуры ВСГ-Т был выполнен комплекс исследований, в условиях изменения схемно-режимных параметров энергосистемы. Как уже было отмечено, в первую очередь это изменение ОКЗ сети и постоянной инерции. Для данных исследований, помимо математического моделирования, использовалась модельная физическая схема. Данная схема строится на гибридном моделировании, в котором математические модели линии и нагрузки решаются на аналоговом уровне, задание коэффициентов модели и системы управления решаются на цифровом уровне, инвертор воспроизводится на физическом уровне с помощью цифруправляемых аналоговых ключей. Полученные результаты моделирования подтвердили сделанные ранее теоретические выводы. Также в рамках исследования были добавлены адаптивные алгоритмы в электромеханические и электромагнитные уравнения ВСГ. Идея предложенного адаптивного управления заключается в изменении виртуальной инерции ВСГ и параметров демпферной обмотки. В рамках исследований было доказано, что

добавление адаптивного управления инерцией и демпфирующими свойствами улучшает качество переходного процесса.

10. В заключении отмечено, что в качестве дальнейших задач, которые стоят перед коллективом научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем», это изготовление собственного СИ с гибким и открытым кодом, с помощью которого будет возможно исследовать и разрабатывать различные алгоритмы управления.

В обсуждении доклада и прениях выступили:

Гусев Ю.П. (НИУ «МЭИ»), Безруких П.П. (НИУ «МЭИ»), Бурмейстер М.В. (НИУ «МЭИ»), Картавцев С.С. (ООО «Системотехника»), Симонов А.В. (ООО «РТСофт-СГ»), Ильина А.А. (НИУ «МЭИ»), Вольный В.С. (НИУ «МЭИ»), Илюшин П.В. (НП «НТС ЕЭС», ФГБУН «ИНЭИ РАН»).

Гусев Ю.П. – Профессор кафедры «Электрические станции» НИУ «МЭИ», к.т.н., профессор.

Отметил актуальность проделанной работы.

Задал докладчику следующие вопросы:

1. Каким образом обеспечивалась синхронизация генерирующих узлов после коротких замыканий в ЭЭС?
2. Каким образом формировался опорный сигнал частоты и угол мощности?

Безруких П.П. – Председатель Комитета ВИЭ РосСНИО, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ «МЭИ», д.т.н.

Отметил многоплановость и содержательность проделанной работы.

Высказал мнение, что стоит обратить внимание на работу реальной ветроэнергетической и солнечной электростанции, и в дальнейших исследованиях учесть стохастический характер выработки электроэнергии этими электростанциями.

Задал докладчику следующие вопросы:

1. Есть ли какие-либо требования по соотношению мощности ВСГ и традиционной электрической станции в изолированной энергосистеме?
2. Почему в представленных исследованиях частота ЭЭС 60 Гц?
3. Существует ли само понятие мощности ВСГ?
4. Каким образом представлена входная величина для генерирующей установки, постоянной величиной или она имеет стохастический характер?

Бурмейстер М.В. – ассистент кафедры «Электроэнергетические системы» НИУ «МЭИ».

Отметил актуальность и масштабность проделанной работы.

Задал докладчику следующие вопросы:

1. Стоит ли вводить новую классификацию для технологии управления СИ в режиме «ведущего»?
2. Какие виды накопителей использовались в исследованиях?
3. Может ли работать ВСГ без использования накопителя электроэнергии?
4. Почему планируется использовать трёхуровневый статический преобразователь, в чем его преимущество?
5. Какой использовался микроконтроллер для расчета алгоритмов ВСГ в разработанном устройстве?
6. Какая преобразовательная техника использовалась MOSFET или IGBT?
7. На базе какого программного обеспечения проводили моделирование?
8. Инвертор, который функционирует в режиме ведущего, представляется в виде PU узла?
9. Централизованное или децентрализованное управление потребуется для параллельной работы ВСГ?

Картавцев С.С. – представитель ООО «Системотехника».

Задал докладчику следующий вопрос: учитывалось ли звено запаздывания при моделировании ВСГ?

Симонов А.В. – директор обособленного подразделения в г. Екатеринбург ООО «РТСофт – СГ».

Отметил актуальность проделанной работы.

Задал докладчику следующие вопросы:

1. Проводилась ли оценка с какой доли объектов ВИЭ в структуре генерирующих мощностей в ЕЭС России могут возникнуть проблемы, которые были озвучены в докладе?
2. Каким образом происходит формирование тока короткого замыкания при функционировании СТАТКОМ?
3. Были ли установлены предельные значения минимального напряжения, которые не приводили к «срыву» расчетов технологических цепочек в блоке ФАПЧ СИ?
4. На сколько изменится цена инвертора при его доработке в промышленном масштабе?

Ильина А.А. – магистрант НИУ «МЭИ».

Задала докладчику следующий вопрос: каким образом выбирались коэффициенты K_P , K_Q для системы управления СИ?

Вольный В.С. – старший преподаватель кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» НИУ «МЭИ».

Задал докладчику следующие вопросы:

1. Какой должен быть оптимальный коэффициент короткого замыкания?
2. Каковы причины изменения коэффициента ОКЗ?

Илюшин П.В. – Председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н.

Отметил масштабность, многоплановость и фундаментальность проделанной работы.

Отметил, что при использовании ВСГ в реальных СИ нужно будет более детально проводить его настройку, чтобы не было конфликтов с АРВ СГ.

Было отмечено, что алгоритмы ВСГ могут быть особенно актуальны для изолированных энергосистем, в которых функционируют предприятия нефтегазовой отрасли.

Задал докладчику следующие вопросы:

1. Использование концепции ВСГ в СИ не помешает ли нормированному и общему первичному регулированию частоты и будет ли ВСГ провоцировать колебательную неустойчивость?

2. Может ли использование быстродействующего алгоритма ВСГ-Т в СИ ветроэнергетических и фотоэлектрических установках позволить данным установкам участвовать в первичном регулировании частоты и тем самым лишить возможности участия в регулировании частоты газотурбинные установки с цифровыми АРЧВ?

3. Насколько чувствительны алгоритмы ВСГ-Т к показателям качества электроэнергии в изолированных энергорайонах?

4. Целесообразно ли использовать алгоритмы ВСГ во вставках постоянного тока большой мощности?

Заслушав выступления экспертов по результатам дискуссии совместное заседание Секций «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», «Возобновляемая энергетика и гибридные энергетические комплексы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в

энергетике **отмечает:**

1. Большую проделанную работу коллектива научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» Томского политехнического университета при реализации концепции ВСГ и ее модернизации для решения актуальных задач в области электроэнергетики.

2. Преимущества разработанной концепции ВСГ-Т над существующими алгоритмами управления СИ.

3. Целесообразность и перспективность проведения научно-исследовательских работ и решения практикоориентированных задач с применением концепции ВСГ-Т при рассмотрении современных изолированных энергосистем.

Совместное заседание Секций «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», «Возобновляемая энергетика и гибридные энергетические комплексы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **решило:**

1. Рекомендовать коллективу научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» Томского политехнического университета продолжить дальнейшие исследования в области управления СИ, в режиме ведущего.

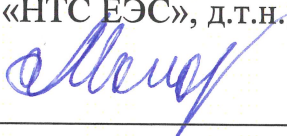
2. Учесть в дальнейшей работе по данной тематике замечания и предложения, высказанные участниками совместного заседания секций НП «НТС ЕЭС» в ходе обсуждения доклада.

3. Рекомендовать организациям ТЭК, занимающимся исследованиями режимов и переходных процессов в электрических сетях, особенно в условиях внедрения объектов генерации на основе ВИЭ и систем накопления электроэнергии, рассмотреть возможность применения системы управления на базе ВСГ-Т в пилотных проектах.

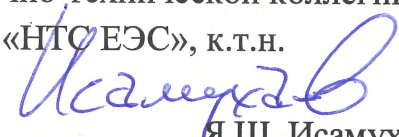
С заключительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. Илюшин П.В., в котором отметил необходимость реализации предложенного подхода к управлению объектами ВИЭ инверторного включения в рамках пилотных проектов реальных ВЭС и СЭС. По результатам реализации пилотных проектов будет возможно широкое тиражирование предложенного подхода на вновь вводимых ВЭС и СЭС,

особенно в изолированных энергорайонах и энергосистемах с большой долей объектов ВИЭ в структуре генерирующих мощностей. Следует рассмотреть возможность реализации предложенного алгоритма управления в инверторных преобразователях ВЭС и СЭС, находящихся в эксплуатации в энергосистемах и изолированных энергорайонах, где уже возникали аварийные ситуации, обусловленные увеличением скорости изменения частоты в переходных процессах, а также их амплитуды и длительности. Разработанный подход к управлению может быть реализован в инверторных преобразователях отечественных заводов-изготовителей, поставляющих данное оборудование на вновь вводимые в эксплуатацию ВЭС и СЭС.

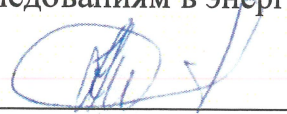
Первый заместитель Председателя
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор


В.В. Молодюк

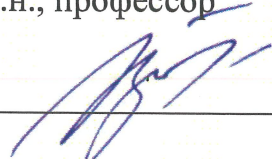
Ученый секретарь
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.


Я.И. Исамухамедов

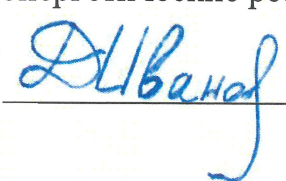
Председатель секции «АСРЭ и РЭР»
НП «НТС ЕЭС», ученый секретарь
Секции по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по системным
исследованиям в энергетике, д.т.н.


П.В. Илюшин

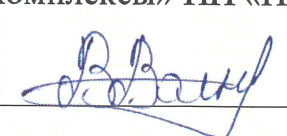
Председатель секции
«Возобновляемая энергетика и
гибридные энергетические
комплексы» НП «НТС ЕЭС»,
д.т.н., профессор


М.Г. Тягунов

Ученый секретарь секции
«Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные
энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС»


Д.А. Ивановский

Ученый секретарь секции
«Возобновляемая энергетика и
гибридные энергетические
комплексы» НП «НТС ЕЭС»


В.С. Вольный