



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



Основана в 1724 году

Российская Академия Наук
Научный совет РАН по системным
исследованиям в энергетике

УТВЕРЖДАЮ

Президент НП «НТС ЕЭС»,
д.т.н., профессор

Н.Д. Рогалев

ПРОТОКОЛ

совместного заседания Научно-технического совета НП «НТС ЕЭС»,
секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные
энергоресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике на тему
**«Механизмы возникновения и способы демпфирования субсинхронных
колебаний в энергосистемах с силовыми инверторными преобразователями»**

21 мая 2025

№ 2/25

г. Москва

Заседание подготовлено секцией «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС»
(председатель Секции д.т.н. **Илюшин П.В.**).

Присутствовали: члены Научно-технического совета НП «НТС ЕЭС»,
члены секций «Активные системы распределения электроэнергии и
распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», Секции по проблемам
НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в
энергетике, АО «СО ЕЭС», ПАО «РусГидро», АО «Россети Научно-технический
центр», ФГБУН «ИНЭИ РАН», ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», ФГБОУ ВО «НИУ
МЭИ», Комитета ВИЭ РосСНИО, ГБОУ ВО «Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет», ИСЭиЭПС ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственных технический университет», ФГБОУ
ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева», ФГАОУ ВО «УрФУ», ФГБОУ ВО
«Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им.
М.И. Платова», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет», ООО
НПП «ЭКРА», ООО «РТСофт-СГ» и другие, всего 74 человека.

Со вступительным словом выступил председатель Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н., **П.В. Илюшин**.

Во вступительном слове **П.В. Илюшин** отметил, что по состоянию на 2025 г. в России суммарная установленная мощность объектов на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) составила 6,59 ГВт или около 2,5% от суммарной установленной мощности электростанций в ЕЭС России. Суммарная мощность ветровых электростанций (ВЭС) составляет 2,57 ГВт, солнечных электростанций (СЭС) – 2,082 ГВт, а малых гидроэлектростанций (установленная мощность до 50 МВт) – 1,3 ГВт. По данным Ассоциации развития возобновляемой энергетики в 2025 г. планируется ввод 2,17 ГВт мощностей на объектах ВИЭ: 1,4 ГВт на ВЭС, 645 МВт на СЭС и 128 МВт на малых ГЭС. В Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2042 г. (утверждена распоряжением Правительства РФ от 30 декабря 2024 г. №4153-р) предполагает относительно невысокие темпы роста мощности объектов ВИЭ (около 0,9 ГВт/год) с увеличением их доли до 10,7% от суммарной установленной мощности электростанций в ЕЭС России. Подавляющая часть генерирующих установок на объектах ВИЭ интегрируются в сеть через силовые инверторные преобразователи, которые имеют определенные особенности. В ряде случаев они содействуют возникновению субсинхронных колебаний в энергосистеме с негативными последствиями для функционирования как других генерирующих установок, так и электроприемников потребителей. Для решения этой проблемы необходимо детально проанализировать механизмы возникновения субсинхронных колебаний и разработать эффективные способы их демпфирования за счет реализации соответствующих алгоритмов управления.

С докладом **«Механизмы возникновения и способы демпфирования субсинхронных колебаний в энергосистемах с силовыми инверторными преобразователями»** выступил Суворов Алексей Александрович, к.т.н., доцент, 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 основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в составе ЕЭС России и в мире в целом. Отмечено, что доля объектов ВИЭ в глобальном объеме строительства новых электростанций достигла уже 87%. При этом планируется строительство и ввод в эксплуатацию как новых ВЭС и СЭС, так и систем накопления электроэнергии, линий и вставок постоянного тока, которые интегрируются в энергосистему через силовые инверторные преобразователи.

2. Классифицированы особенности силовых инверторных преобразователей с точки зрения влияния на переходные процессы. Выделена проблема плотности электрической сети, проявляющейся в снижении отношения короткого замыкания. Совокупность особенностей приводит к возникновению не фиксировавшихся ранее режимов и переходных процессов, одним из которых являются субсинхронные колебания. Приведена классификация известных видов

субсинхронных колебаний, предложенная CIGRE в 2023 г., а также анализ возникающих колебаний, проведенный рабочей группой IEEE. Тем не менее события, связанные с возникновением субсинхронных колебаний, зафиксированных в Китае (2014-2015 гг.) и Канаде (2018-2019 гг.) являются крайне исключительными, что подтверждает необходимость дальнейшего изучения этих явлений. Приведена классификация устойчивости, предложенная университетом Цинхуа в 2021 г., выделяющая субсинхронные колебания в некий тренд, а не как отдельное редкое явление, который будет наблюдаться в энергосистемах и влияние которого должно найти отражение в нормативно-технических документах.

3. Представлены результаты анализа настроек систем автоматического управления силовыми инверторными преобразователями на субсинхронные колебания с помощью передаточных функций. Из полученного линеаризованного уравнения для активной мощности можно сделать вывод, что приращение активной мощности зависит от изменения тока по оси d и напряжения в точке подключения, которое выражается через приращения токов по осям d и q , зависящих от индуктивного сопротивления сети и загрузки силового инверторного преобразователя по активной мощности. Анализ показал, что причиной субсинхронных колебаний также может являться взаимовлияние регуляторов напряжения и активной мощности. Улучшить ситуацию с механизмом возникновения субсинхронных колебаний возможно за счет увеличения полосы пропускания регулятора напряжения, т.е. увеличения быстродействия.

4. Представлены результаты внедрения технических решений по борьбе с субсинхронными колебаниями: замена регулятора напряжения на регулятор реактивной мощности, замена регулятора активной мощности на регулятор напряжения в цепи постоянного тока. Однако, указанные изменения существенно не влияют на устойчивость. Показано влияние блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ): при увеличении полосы пропускания происходит увеличение области устойчивости, однако субсинхронные колебания могут возникать из-за задержки в блоке ФАПЧ при взаимодействии с динамикой сети.

5. Проведен анализ собственных чисел детальной модели силового инверторного преобразователя в пространстве состояний. Полученные результаты подтвердили, что сделанные аналитические выводы о механизмах возникновения субсинхронных колебаний с помощью упрощенных моделей достоверны практически для всех случаев. Отмечено, что при уменьшении загрузки силового инверторного преобразователя проявляется новый механизм возникновения колебаний, обусловленный взаимодействием сопоставимых по скорости внешних регуляторов и блока ФАПЧ в условиях слабой сети. Увеличить область устойчивости в этом случае возможно за счет уменьшения быстродействия ФАПЧ или внешних регуляторов. Однако такая настройка не подходит при увеличении загрузки инверторного преобразователя. Следовательно, использование одинаковой настройки регуляторов для разных схемно-режимных условий работы силового инверторного преобразователя недопустимо.

6. Проведено моделирование во временной области с использованием полученных осциллограмм трехфазных токов для оценки спектра возникающих субсинхронных колебаний. Для дальнейшей оценки полученных механизмов и

причин возникновения субсинхронных колебаний проведено тестирование в замкнутом цикле. Система управления была реализована в промышленном микроконтроллере, с помощью которого в реальном времени осуществлялось управление цифровой моделью инверторного преобразователя. Полученные экспериментальные результаты подтвердили сделанные ранее выводы на основе упрощенных и детальных моделей силового инверторного преобразователя.

7. Представлена таблица, обобщающая механизмы возникновения и особенности субсинхронных колебаний. Классификация основана на разделении механизмов по используемым регуляторам, различные комбинации которых определяют механизмы возникновения субсинхронных колебаний. Доказано, что механизмы возникновения колебаний разнообразны. В результате усложняются мероприятия по их демпфированию, поскольку необходимо согласовывать настройку регуляторов между собой исходя из условий внешней сети. При этом одна и та же настройка может не подходить для разных схемно-режимных ситуаций. Далее представлены мероприятия по борьбе с субсинхронными колебаниями, в частности модернизация структуры управления силовыми инверторными преобразователями и изменение подходов к их управлению.

8. Приведены результаты моделирования субсинхронных колебаний в слабой сети, в которую интегрирована СЭС с регулятором демпфирования и без него. Применение дополнительных контуров для демпфирования субсинхронных колебаний, является эффективной мерой, но крайне ограниченной в применении. Отмечено, что активно развивается новая идеология перевода силового инверторного преобразователя в режим «ведущий» при параллельной работе с сетью. Режим «ведущий» сводится к возможности формирования фазы для опорного сигнала и изменению структуры внешних регуляторов для формирования амплитуды опорных напряжений. Отмечено, что в рамках направления «ведущий» наиболее перспективной считается концепция виртуальной синхронной машины или генератора (ВСГ). Проведен анализ структур ВСГ, в частности с выявлением проблемы ВСГ, управляемого по напряжению (ВСГ-Н), заключающейся в появлении субсинхронных колебаний в сильной сети из-за взаимовлияния контуров управления активной и реактивной мощностью.

9. Разработана принципиально новая структура алгоритма управления на основе ВСГ, позволяющая решать проблему субсинхронных колебаний за счет ряда особенностей. Основные из них заключаются в формировании тока в качестве опорного сигнала, позволяя тем самым корректно работать и в сильной, и в слабой сети, а также в параллельной структуре формирования опорных токов, что приближает значение внутреннего угла ВСГ к нулю. Реализуемость алгоритма проверена на моделях, в замкнутом цикле и на разработанных экспериментальных инверторных преобразователях. Новая структура была дополнена согласнопараллельным регулятором, что позволило сократить порядок модели до второго и обеспечить при этом эффективное демпфирование субсинхронных колебаний, сохранив все преимущества. Продемонстрировано, что для ВСГ-Н в условиях сильной сети возникает проблема взаимовлияния мощностей, приводящая к всплеску реактивной мощности. В разработанной структуре таких проблем не наблюдается. Следовательно, модифицированная структура с согласно-

параллельным регулятором обладает всеми необходимыми свойствами, не уступает традиционным структурам ВСГ, а в некоторых аспектах превосходит их.

10. В заключении отмечено, что в качестве дальнейших задач, которые стоят перед коллективом научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» (НИЛ «МЭЭС») Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», является исследование методов борьбы с субсинхронными колебаниями, основанных на использовании распределенных по сети устройств FACTS.

В обсуждении доклада и прениях выступили: Илюшин П.В. (НП «НТС ЕЭС», ФГБУН «ИНЭИ РАН»), Ачитаев А.А. (ПАО «РусГидро»), Сорокин Д.В., Стадников А.Н. (АО «Россети Научно-технический центр»), Вольный В.С. (ФГБУН «ИНЭИ РАН»), Портнов А.А. (АО «Энергетические Технологии»), Гусев Ю.П., Тягунов М.Г. (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), Ивановский Д.А. (АО «СО ЕЭС»).

Совместное заседание отмечает:

1. Количество силовых инверторных преобразователей, интегрируемых в ЕЭС России, ежегодно возрастает, что обусловлено строительством новых ВЭС и СЭС, вводом систем накопления электроэнергии, линий и вставок постоянного тока. В связи с этим задача анализа особенностей и проблемных вопросов функционирования силовых инверторных преобразователей, включая механизмы возникновения субсинхронных колебаний, является актуальной.

2. При массовом внедрении в энергосистемы оборудования с силовыми инверторными преобразователями возникают новые причины возникновения субсинхронных колебаний и нарушений устойчивости, которые могут приводить к системным авариям с нарушением электроснабжения потребителей.

3. Учет положительных и отрицательных аспектов применения силовых инверторных преобразователей на основе международного опыта позволит избежать применения некорректных технических решений, а также адаптировать наиболее эффективные решения к особенностям российской электроэнергетики.

4. Представленная в докладе разработанная система управления силовым инверторным преобразователем на основе виртуального синхронного генератора, использующего ток в качестве опорного сигнала, позволяет эффективно демпфировать субсинхронные колебания. Ее применение позволит в значительной степени решить одну из проблем электрических сетей, в которые интегрируются новые объекты ВИЭ и системы накопления электроэнергии.

Совместное заседание решило:

1. Одобрить выполненный в НИЛ «МЭЭС» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» комплекс работ по созданию силового преобразователя с современной гибкой системой управления, внедрение результатов которого позволяет повысить устойчивость в электрических сетях с силовыми инверторными преобразователями.

2. Рекомендовать автору продолжить исследования по выявлению особенностей и проблемных вопросов функционирования силовых инверторных преобразователей в составе энергосистем, а также периодическое представление новых результатов на Пленарных и секционных заседаниях НП «НТС ЕЭС».

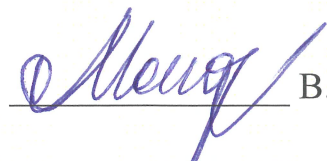
3. Рекомендовать научному сообществу проанализировать, какие из рассмотренных в докладе тематик являются наиболее перспективными для проведения дальнейших исследований в области применения силовых инверторных преобразователей в ЕЭС России.

4. Рекомендовать субъектам электроэнергетики ознакомиться с новыми причинами нарушений устойчивости в энергосистемах с целью их учета при формировании планов перспективного развития ЕЭС России, а также разработке новых и актуализации действующих нормативно-технических документов.

С заключительным словом выступил д.т.н. **П.В. Илюшин**, 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».

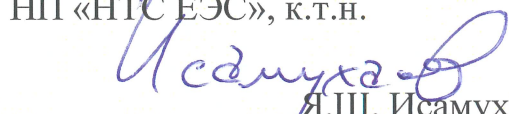
П.В. Илюшин отметил, что дальнейшее увеличение суммарной мощности генерирующих установок с силовыми инверторными преобразователями в составе ЕЭС России без устранения причин возникновения субсинхронных колебаний может привести к крайне негативным последствиям. Анализ международного опыта показывает, что возникновение субсинхронных колебаний являются нарастающим трендом в энергосистемах разных стран, приводящим к системным авариям с нарушением электроснабжения потребителей, а не отдельным редким явлением. Для недопущения аналогичных проблем в ЕЭС России необходима разработка соответствующих требований, а также разработка и реализация технических решений по демпфированию субсинхронных колебаний.

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



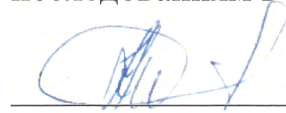
В.В. Молодюк

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



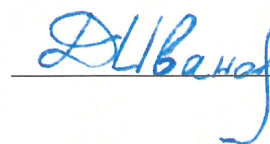
А.И. Исамухамедов

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

Ученый секретарь секции «Активные
системы распределения ЭЭ и РЭР»
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.



Д.А. Ивановский