



**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

Н.Д. Рогалев

«15» ноября 2021 г.

ПРОТОКОЛ № 6

совместного заседания Секции «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и
Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по
системным исследованиям в энергетике на тему: **«Низкочастотные колебания
параметров электроэнергетического режима в распределительных сетях и
системах электроснабжения вследствие функционирования электрической
нагрузки»**

02 ноября 2021 года

Заседание в дистанционном формате

Присутствовали: члены секции «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», сотрудники
НП «НТС ЕЭС», ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», НИК С6 РНК
СИГРЭ, ФГБУН «ИНЭИ РАН», ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», ИСЭиЭПС ФИЦ
Коми НЦ УрО РАН, ФГБУН «ИОНХ РАН», ФГБУН «ИНП РАН», ФГБУН
«ИНХС РАН», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента
России Б.Н. Ельцина», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-
экономический университет», Общевойсковой академии ВС РФ, ФГБОУ ВО
«Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева», ООО НПП «ЭКРА», ОАО «ВНИИР»,

ООО «Инженерный центр «Энергосервис», ООО «АльтЭнергия», ООО «Интеллэнергия», АО «РАСУ», ООО «РТСофт-СГ», ООО «ИНТЭЛАБ», Комитет ВИЭ РосСНИО, всего **45** 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 проблема существования низкочастотных колебаний параметров режима в распределительных сетях и системах электроснабжения промышленных предприятий известна достаточно давно, что обусловлено особенностями функционирования отдельных электроприемников потребителей. Однако она не стояла остро до последнего времени, пока не возникло, как минимум, две причины, которые потребовали заняться данным вопросом более серьезно. Первая причина – это интеграция генерирующих установок распределенной генерации в распределительные сети и системы электроснабжения промышленных предприятий, а вторая – внедрение на предприятиях высокочувствительных к показателям качества электроэнергии технологических линий зарубежных заводов-изготовителей. В новых условиях необходимо разобраться в причинах возникновения низкочастотных колебаний в распределительных сетях, определиться с возможными способами выявления их источников, а также разработать набор эффективных технических решений, который позволял бы минимизировать их негативное влияние на электрооборудование, функционирующее в составе распределительных сетей.

С докладом **«Низкочастотные колебания параметров электроэнергетического режима в распределительных сетях и системах электроснабжения вследствие функционирования электрической нагрузки»** выступил Самойленко Владислав Олегович, к.т.н., доцент кафедры Автоматизированных электрических систем ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина».

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

1. Утвержденное нормативной документацией в ГОСТ Р 57114-2016 определение низкочастотных колебаний (НЧК) как периодических изменений параметров электроэнергетического режима с частотой от 0,01 Гц до 5,00 Гц, возникающих в результате взаимных качаний роторов синхронных машин, не отражает всю суть процесса применительно к распределительным сетям (РС) и системам электроснабжения (СЭ). Данное определение исключает автоколебательные процессы, влияние крупных электроприемников нагрузки и

новых специфических устройств, таких как установки на основе ВИЭ и накопители электроэнергии, на их возникновение.

2. Проблема НЧК в крупных энергосистемах относительно хорошо изучена теоретически. В мировых научнотехнических базах данных Scopus, Web of Science, IEEE xPlore Digital Library и российской e-Library (РИНЦ) количество статей по данной теме превышает несколько сотен. В то же время, количество релевантных материалов, применительно к НЧК в распределительных сетях и системах электроснабжения статей, не превышает ~15 единиц.

3. Синхронные машины (двигатели, генераторы) в РС и СЭ склонны как к межмашинным колебаниям, так и к колебаниям относительно энергосистемы. Иные электрические нагрузки сами не поддерживают НЧК, но могут инициировать колебания синхронных машин относительно энергосистемы. Поиск потенциальных источников НЧК возможен как по технологии привода, так и по типу технологического процесса промышленных предприятий, где чаще всего и регистрируются НЧК. По первой классификации потенциально опасны, как источники НЧК, мощные технологические посты (позиции) с непрерывной работой и неизменной скоростью, которые чаще всего приводятся во вращение синхронными двигателями. По второй классификации потенциально опасны, как источники НЧК, мощные технологические посты (позиции), выполняющие механообработку твердых тел и перекачку газообразных веществ, также часто приводимых во вращение синхронными двигателями.

4. Помимо синхронных двигателей источниками НЧК могут являться асинхронные двигатели с включением через частотно-регулируемый электропривод, в случае нарушения условий подключения последних: превышение длин питающей и питаемой кабельных линий (не рекомендованное производителем соотношение R/X), отсутствие проверки на резонансные явления проектом и др. Наименее опасны асинхронные двигатели непосредственного включения, которые не предназначены для циклических пусков с частотой, попадающей в область НЧК, а также не поддерживающие прямые межмашинные колебания с синхронными машинами.

5. По типу приводимого механизма среди «твёрдых» нагрузок наиболее опасны с точки зрения НЧК шаровые мельницы сухого и мокрого помола, в меньшей степени дробилки и молотилки. Своебразные асимметричные колебания мощности могут производиться экскаваторами типа ЭКГ, распространёнными в горнодобывающей отрасли. Транспортеры совмещают черты непрерывных и циклических нагрузок. Особенностью транспортеров является изменение степени загрузки в темпе процесса + циклическое включение-отключение механизмов разгрузки и очистки. Мехатронная нагрузка является наиболее проблемной нагрузкой из циклических нагрузок для

собственной генерации, ввиду цикла 0-100-0% мощности менее чем за 20 с. Электроснабжение подобных нагрузок в автономном режиме функционирования систем электроснабжения в ряде случаев невозможно без реализации дополнительных организационно-технических мероприятий.

7. При рассмотрении «газообразных» нагрузок авторами отмечается теоретическая возможность возникновения НЧК в газовых системах. Периодические автоколебания в газовоздушном тракте принципиально возможны, но промышленные системы вентиляции и перекачки газов короткие и относительно не склонны к волновым процессам, а в длинных газопроводных имеется большое затухание. Намного чаще наблюдается циклическое изменение мощности вследствие работы технологической автоматики поддержания давления, при которой постепенно накапливаемое избыточное давление периодически «стравливается» через байпас или обходной клапан. С переходом от открытой газовоздушной системы к замкнутой, а также со снижением расхода газа в системе, характер нагрузки плавно меняется с непрерывного на циклический с увеличением неравномерности мощности и длительности цикла.

8. «Жидкостные» нагрузки потенциально наиболее благоприятны с точки зрения малой вероятности возникновения НЧК. Это обусловлено физическими свойствами жидкости с одной стороны – малой сжимаемостью, а с другой, с достаточной вязкостью жидкости (внутренним трением) по сравнению с «газообразными» нагрузками. В системе электроснабжения с «жидкостными» нагрузками может регистрироваться циклическое изменение мощности вследствие работы технологической автоматики поддержания напора (давления), как и при газообразных нагрузках. Частоты изменения мощности существенно ниже порога НЧК, в том числе и при включении-отключении насосов в промышленных и коммунально-бытовых котельных.

9. Общими особенностями НЧК в РС и СЭ являются:

- мощность электроприемников нагрузки одного порядка, а зачастую больше, чем генераторов на объектах распределенной генерации, с учетом коэффициентов загрузки и использования;
- НЧК происходят не только по сечению «синхронная машина – энергосистема», но и внутри системы электроснабжения (межмашинные взаимодействия). В этом случае сопротивление между машинами практически отсутствует;
- преобладают механические источники колебаний. Электромагнитное демпфирование носит сильный характер (преобладает активное сопротивление, имеются демпферные клетки синхронных двигателей), колебания только вынужденные;
- при «твердых» механических причинах нагрузочных НЧК первичны

углы. Ввиду нелинейности угловых характеристик, особенно с учетом реактивного момента, равенство углов приводит к неравенству мощностей. Амплитуда отрицательной полуволны больше амплитуды положительной полуволны на 5-15%;

- АРВ незначительно влияют на протекание колебаний:
 - «слабые» и «медленные» системы возбуждения, коэффициенты мощности близки к 1;
 - АРВ на СД не применяется или выведено из-за износа щеток;
 - АРВ на синхронных генераторах объектов распределенной генерации не введено при пусконаладочных работах или выведено в нарушение российской НТД из-за проблем с тепловым балансом газопоршневых установок (ГПУ).

10. Генерирующие установки малой и распределенной генерации лучше переносят апериодический характер изменения мощности (в пределах одного цикла прироста-снижения нагрузки), чем постоянный динамический переход в непрерывные НЧК. Стойкость к нагрузочным НЧК можно косвенно оценить по соответствующим стандартам нагружения в автономном режиме, как ГОСТ ISO 8528-5-2017. ГПУ классом выше лучше сопротивляются НЧК, но при этом быстрее изнашиваются. Работа ГПУ при НЧК ведет к ускоренному до 50% износу и повышению дисконтированного срока окупаемости электростанции до 12+ лет, что лишает проект их внедрения выгодности.

Другие последствия НЧК включают: срабатывание защиты по низкочастотной вибрации подключенных генерирующих агрегатов; пуск II-III ступеней МТЗ, срабатывающий не происходит ввиду наличия выдержки времени; затрудненная синхронизация при амплитуде качаний электрического угла более 5°; отказ синхронизации или отключение защитами Vector Jump, Vector Shift при амплитуде качаний электрического угла более 8°.

11. Наибольшую опасность для прилегающей распределительной сети при НЧК представляют эффекты, связанные с воздействием на дистанционную защиту. Расчеты уставок дистанционной защиты и блокировки от качаний на ВЛ в распределительной сети, выполненные в работе, показывают, что отстройка от номинального нагрузочного режима, без учета НЧК, может приводить к перманентному сработанному состоянию блокировки от качаний и заблокированной дистанционной защите, в т.ч. при КЗ. При отстройке от фактической нагрузки (ниже номинальной) возможно несрабатывание блокировки от качаний и пуск дистанционной защиты ВЛ (срабатывания не произойдет ввиду значительной выдержки времени III-IV ступеней).

12. Информационное обеспечение в виде высокодискретных измерений действующих значений параметров режима является важнейшей частью борьбы

с нагрузочными НЧК. Наиболее эффективным средством устранения нагрузочных НЧК является устранение механического первоисточника колебаний или перенастройка технологического процесса. Другие различные методы носят характер вспомогательных или экономически являются, как правило, высокозатратными.

В обсуждении доклада и прениях выступили: Илюшин П.В. (председатель секции), Назарычев А.Н. (ФГБОУ ВО «СПГУ»), Бык Ф.Л. (ООО «Интелэнергия»), Бердин А.С. (ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»), Рабинович М.А. (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»), Безруких П.П. (Комитет ВИЭ РосСНИО), Воротницкий В.Э. (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»), Мокеев А.В. (ООО «Инженерный центр «Энергосервис»), Ачитаев А.А. (СШФ ФГАОУ ВО «СФУ»).

Илюшин П.В. – Председатель секции «АСРЭ и РЭР», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н.

Отметил, что в отношении систем управления мощностью локальных энергообъектов и отдельных генерирующих установок корректнее употреблять обозначения «АРЧВ» или «ГРАМ», чем «АРЧМ».

Обратил внимание, что дробилки и молотилки присутствуют в большом количестве в качестве электроприемников в системах собственных нужд тепловых угольных электростанций, но не оказывают существенного влияния на работу синхронных генераторов, с точки зрения НЧК, вследствие несопоставимости мощностей.

Отметил, что проблемы НЧК в РС и СЭ потенциально интересуют иной, по сравнению с системообразующими сетями, круг субъектов – собственников объектов распределенной генерации и распределительные сетевые компании.

Поддержал мнение докладчика об опасности электродвигателей с частотно-регулируемым электроприводом в качестве источников НЧК.

Назарычев А.Н. – Профессор кафедры «Электроэнергетика и электромеханика» Санкт-Петербургского горного университета, д.т.н., профессор.

Отметил перспективность исследования влияния НЧК на оценку износа и управление жизненным циклом силовых трансформаторов.

Уточнил мнение докладчика о степени опасности асинхронных двигателей прямого включения в качестве источников НЧК.

Бердин А.С. – Профессор кафедры «Автоматизированные электрические системы» ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», д.т.н., профессор

Отметил, что в динамике возникает реактивный момент сопротивления нагрузки, который оказывает значительное влияние на амплитудно-частотные и энергетические характеристики НЧК.

Бык Ф.Л. – Директор ООО «Интелэнергия», к.т.н., доцент.

Обратил внимание, что источники НЧК в РС и СЭ существуют уже длительное время, а усиление внимания к НЧК, как и более частое проявление таких режимов, происходит вследствие широкого распространения объектов распределенной генерации, как наиболее чувствительных к НЧК элементов системы электроснабжения.

Выразил мнение, что противодействовать НЧК в определенных пределах возможно за счет правильного выбора состава установленного (включенного) генерирующего оборудования на объектах распределенной генерации.

Рабинович М.А. – Главный научный сотрудник АО «НТЦ ФСК ЕЭС», д.т.н.

Обратил внимание, что амплитудно-частотные и энергетические характеристики НЧК будут существенно видоизменяться в зависимости от степени загрузки оборудования, вовлеченного в НЧК.

Безруких П.П. – Председатель Комитета ВИЭ РосСНИО, д.т.н.

Отметил, что необходимо расширять охват тематики НЧК в РС путем исследования влияния объектов ВИЭ на характер протекания НЧК.

Воротницкий В.Э. – Главный научный сотрудник АО «НТЦ ФСК ЕЭС», д.т.н., профессор.

Отметил, что в РС и СЭ остро стоит проблема с недостаточностью информационного обеспечения (измерительных устройств и комплексов; систем сбора и передачи информации), что препятствует своевременной фиксации и идентификации источников НЧК.

Обратил внимание, что решению проблемы отсутствия достаточного информационного обеспечения для идентификации источников НЧК будет способствовать обновление базы нормативно-правовых и нормативно-технических документов.

Выразил мнение, что потенциально тематика НЧК в РС может быть интересна электросетевым компаниям.

Мокеев А.В. – Заместитель генерального директора ООО «Инженерный центр «Энергосервис», д.т.н., профессор.

Отметил, что устройства синхронизированных векторных измерений уже начинают устанавливаться в распределительных сетях, что принципиально может решать проблему идентификации источников НЧК. Проинформировал, что частично информация по данному вопросу имеется в подготовленных к публикации научных статьях сотрудниками ООО «Инженерный центр «Энергосервис», индексируемых в библиотеке IEEE xPlore Digital Library.

Заслушав выступления и мнения экспертов по результатам дискуссии совместное заседание Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НТК НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **отмечает:**

1. Важность и актуальность поднятой в докладе проблемы возникновения низкочастотных колебаний параметров электроэнергетического режима в распределительных сетях и системах электроснабжения.

2. Необходимость обмена в научно-техническом сообществе, с выходом на представителей субъектов электроэнергетики и промышленности, актуальной информацией практического характера для совместного обсуждения и решения текущих инженерно-технических задач.

3. Важность получения для последующего рассмотрения и анализа информации от реальных измерительных комплексов о возникновении НЧК в электроэнергетической системе.

4. Необходимость выявления причин возникновения низкочастотных колебаний в распределительных сетях и системах электроснабжения, разработки способов и средств выявления их источников, а также создания набора эффективных технических решений, который позволял бы минимизировать их негативное влияние на электрооборудование.

5. Важность обновления базы нормативно-правовых и нормативно-технических документов для решения проблемы отсутствия достаточного информационного обеспечения для идентификации источников НЧК.

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

1. Рекомендовать автору продолжить исследования в области анализа причин возникновения и разработки эффективных способов выявления источников НЧК в распределительных сетях и системах электроснабжения.

2. Рекомендовать организациям, занятым вопросами проектирования, строительства и ввода в эксплуатацию объектов распределительного сетевого комплекса и систем электроснабжения, использовать в работе перечень выявленных проблемных нагрузок, с целью предпроектного обследования на предмет наличия НЧК и разработки мероприятий по их устранению.

3. Рекомендовать распределительным сетевым компаниям рассмотреть возможность использования устанавливаемых устройств синхронизированных векторных измерений для решения проблемы идентификации источников НЧК.

4. Рекомендовать ТК 016 «Электроэнергетика» Росстандарта рассмотреть вопрос о корректировке действующих ГОСТ Р для совершенствования системы информационного обеспечения с целью идентификации источников НЧК.

5. Рекомендовать автору выступить в 2022 г. на секции «АСРЭ и РЭР» НП «НТС ЕЭС», как представителя РФ в подкомитете SC C6 CIGRE «Активные распределительные системы и распределенная генерация», с докладом о мировых трендах и тенденциях развития распределительных сетей.

С заключительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», д.т.н. Илюшин П.В., в котором отметил, что вопрос анализа причин возникновения и выявления источников НЧК в распределительных сетях и системах электроснабжения нуждается в дальнейшей всесторонней теоретической и практической проработке, а также требует уделения этой проблеме соответствующего внимания со стороны субъектов электроэнергетики.

Первый заместитель Председателя
Научно-технической коллегии,
д.т.н., профессор



B.V. Молодюк

Ученый секретарь Научно-
технической коллегии, к.т.н.



Я.Ш. 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»



Д.А. Ивановский