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
«14» сентября 2026 г.

ПРОТОКОЛ № 8

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

10 сентября 2026 года г. Москва

Присутствовали: члены секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», члены секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике, представители ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», ФГБУН «ИНЭИ РАН», ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», АО «Россети Научно-технический центр», ФГБОУ ВО «ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова», ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственных технический университет», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ООО НПП «ЭКРА», «ООО «РТСофт-СГ», всего **52** человека.

Со вступительным 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.

Во вступительном слове было отмечено, что современные системы промышленного электроснабжения функционируют в условиях интенсивного роста доли нелинейных и несимметричных нагрузок, что приводит к существенным проблемам с обеспечением нормируемых показателей качества электроэнергии в узлах промышленной нагрузки. В таких условиях особую значимость приобретает вопрос обеспечения устойчивого функционирования алгоритмов и корректного задания уставок устройств защиты и автоматики, применяемых в таких системах. Подчеркнуто, что рассматриваемые результаты имеют не только теоретическое, но и важное прикладное значение, так как значительная их часть основана на натурных испытаниях и измерениях, выполненных автором на реальных объектах, что позволяет содержательно оценить, каким образом полученные научные наработки могут быть внедрены на практике и какой эффект от этого может быть получен. Отмечено, что поскольку результаты прикладных научных исследований должны находить практическое применение, то в ходе заседания предстоит рассмотреть, каким образом предложенные в диссертационной работе технические решения могут быть эффективно использованы для решения вышеизложенных проблем в системах промышленного электроснабжения.

С докладом **«Устойчивость функционирования защиты и автоматики электротехнических комплексов промышленной нагрузки в условиях искажений токов и напряжений»** выступил Федосов Денис Сергеевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»), г. Иркутск.

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

1. Отмечено, что современные электротехнические комплексы промышленных нагрузок и транспорта функционируют в условиях систематических искажений токов и напряжений – несинусоидальности, несимметрии и колебаний амплитуды сигналов, обусловленных характером самой нагрузки. Действующая нормативная база и выпускаемые устройства защиты и автоматики ориентированы преимущественно на сети напряжением 110 кВ и выше, где источники искажений практически отсутствуют, тогда как для узлов промышленной нагрузки (УПН) отраслевые требования с учетом искажений сигналов практически не разработаны. Переход к микропроцессорным терминалам обострил проблему их повышенной чувствительности к искажениям входных сигналов тока и напряжения по

сравнению с электромеханическими аналогами.

2. Показано, что особенность электротехнического комплекса промышленной нагрузки состоит в том, что один и тот же потребитель может одновременно являться источником искажений и объектом их воздействия через систему защиты и автоматики, что требует предварительной диагностики электромагнитной обстановки в узле. Сформулирована задача обеспечения не просто надежности, а устойчивости функционирования защиты и автоматики к искажениям тока и напряжения – как способности выполнять заданные функции при непрерывном воздействии неблагоприятных факторов, оставаясь одновременно чувствительной к внутренним коротким замыканиям (КЗ), отстроенной от внешних КЗ и искаженных сигналов нормального режима.

3. В основу исследования была положена гипотеза о том, что диагностика искажений токов и напряжений в нормальном режиме является необходимым основанием для адаптивной настройки алгоритмов защиты и автоматики в аварийном режиме. На ее основе была разработана концепция электротехнического комплекса, в котором результаты мониторинга искажений формируют паспорт УПН, который используется для последующей корректировки уставок и логики защит на проектном, эксплуатационном и оперативном горизонтах.

4. Натурными измерениями в УПН Иркутской области и других регионах подтвержден систематический характер искажений. На подстанциях (ПС) тягового транзита несимметрия напряжений по обратной последовательности в отдельных режимах составляет 27% (превышение нормы в 13,5 раз); суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на шинах 110 кВ тяговых ПС достигает 21% при норме 2%, на шинах 220 кВ ГЭС, питающей алюминиевый завод, до 9,4%, а на шинах удаленных потребителей в электрической сети – до 67%. Показано, что по мере роста объемов перевозок и доли преобразовательных нагрузок уровни искажений могут дополнительно вырасти в 1,5-2 раза. Отмечено, что волновые эффекты на длинных ВЛ вызывают резонансное усиление гармоник на отдельных участках.

5. Приведены характерные случаи срабатывания защиты вследствие искажений сигналов токов и напряжений: отключение защитой батареи статических конденсаторов (БСК) на ПС горнодобывающего предприятия при содержании 2-й гармоники в токе БСК 48% и отсутствии КЗ; неселективное срабатывание дифференциальной защиты трансформатора при пуске двигателя 6 кВ из-за насыщения трансформатора тока (ТТ) апериодической составляющей при предыдущем неуспешном пуске; систематические отключения двигателей 6 кВ на нефтеперекачивающей станции из-за несимметрии токов и напряжений от тяговой нагрузки.

6. Аналитически доказано и подтверждено расчетами, что напряжение искажения в УПН не обладает свойством аддитивности, вследствие чего

применяемое на практике разложение на «долевые вклады» потребителей математически и физически некорректно. Предложены понятия автономного напряжения искажения (напряжения, которое потребитель создавал бы в узле при условно автономной работе) и коэффициента влияния для численной оценки вклада каждого потребителя в несинусоидальность и несимметрию. Параметры схемы замещения потребителя определяются по методу двух измерений параметров режима без специальных коммутаций; верификация на разнотипных присоединениях (реакторы, синхронные и асинхронные двигатели, вентильные преобразователи, синхронные генераторы, тяговые трансформаторы) показала погрешность не более 7%.

7. Для оперативного выявления источников искажений разработан корреляционный метод экспресс-анализа: потребитель идентифицируется как потенциальный источник искажений при коэффициенте корреляции между напряжением искажения в узле и током его присоединения менее 0,6. Применение метода на данных транзита Тайшет-Тулун однозначно выявило тяговые подстанции как источники несимметрии и подтвердило неискажающий характер прочих нагрузок. На основе коэффициента влияния предложен механизм дифференцированных штрафных надбавок к тарифу с целевым расходованием средств на установку фильтрокомпенсирующих устройств. На имитационной модели показана обоснованность такого механизма.

8. Для оценки устойчивости защиты к искажениям параметров нормального режима предложена система вероятностных критериев на основе матрицы условных вероятностей правильного срабатывания D и неправильного (ложного или неселективного) срабатывания F, формируемой методом Монте-Карло. Оптимальная уставка определяется максимизацией разности $(D - 1 \cdot F)$, интегральной мерой качества алгоритма служит площадь под ROC-кривой. Показано, что традиционный детерминированный коэффициент чувствительности ($K_ч$) не позволяет различить алгоритмы защиты по устойчивости, тогда как предложенный вероятностный подход выявляет между ними принципиальные различия.

9. Применение матрицы вероятностей в дифференциальной защите силового трансформатора при 5184 режимах внешних КЗ с глубоким насыщением ТТ показало, что базовый алгоритм торможения и блокировки по 2-й гармонике дает 64% неселективных срабатываний, тогда как совместное применение дифференциально-фазного органа и блокировки по апериодической составляющей обеспечивает отсутствие неселективных срабатываний при 100%-ном срабатывании при внутреннем КЗ, в то время как все сравниваемые алгоритмы формально удовлетворяли нормативному $K_ч \geq 2$.

10. Введено понятие устойчивости определения места повреждения (ОМП) как вероятности непревышения нормированной ошибки (зоны обхода по СТО 56947007-29.240.55.159-2013) в условиях искажений параметров

аварийного режима, и предложена система из четырех вероятностных критериев – среднеквадратическая ошибка, вероятная ошибка, максимальная ошибка и средний риск. Показано, что при групповом алгоритме ОМП байесовская оценка расстояния по независимым нормально распределенным ошибкам частных методов является взвешенным средним, а результирующая дисперсия не превышает дисперсии единичных методов.

11. На модели ВЛ 220 кВ Луч-Нагорная при имитации 63 тыс. однофазных КЗ для трех частных методов ОМП (прибор ИМФ-3Р, метод по реактивной мощности, метод Такаги) ошибка единичных методов составила около 1,5 км, группового алгоритма – 0,88 км. Проверка на аварийных осциллограммах Нижегородской энергосистемы подтвердила выигрыш группового алгоритма в 3-5% по точности и в 10-15% по величине зоны обхода.

12. Исследованы 4 способа формирования тока торможения в 300 режимах внешних КЗ с насыщением ТТ на примере дифференциальной защиты синхронного генератора. Показано, что для ряда режимов проблема неселективных срабатываний может быть решена только изменением алгоритма торможения. Дополнительно предложено применение дифференциально-фазного органа (по углу между векторами токов плеч) и блокировки по апериодической составляющей дифференциального тока, реагирующей на первопричину насыщения ТТ. На моделях 8 серийно выпускаемых терминалов дифференциальной защиты разных производителей (MiCOM, ЭКРА, Механотроника, Бреслер, ABB) в 800 режимах внешних КЗ получено «нуль» неправильных срабатываний при максимальном замедлении срабатывания в режимах внутренних КЗ не более 0,06-0,1 с.

13. Предложен способ восстановления периодической составляющей вторичного тока ТТ по трем последовательным отсчетам на интервале неискаженной трансформации, дающий аналитическое решение без итераций и без априорной информации о параметрах ТТ, с методической погрешностью менее 1%. Показано, что в составе дифференциальной защиты шин при остаточной индукции ТТ до ±90% от индукции насыщения ток небаланса не превышает 0,4 о.е. Реализация возможна заменой программного обеспечения терминалов защиты без модернизации измерительных цепей.

14. Для токовой защиты обратной последовательности, работающей на фоне несимметрии, создаваемой тяговой нагрузкой, предложено использовать не только модуль тока обратной последовательности, но и его угловое положение на комплексной плоскости, поскольку области утяжеленного нормального режима и минимального КЗ могут пересекаться по модулю. Модифицированный алгоритм с областями срабатывания по комплексному отношению токов обратной и прямой последовательности и органом по приращению тока обратной последовательности показал в 300 режимах включения несимметричной нагрузки толчком «нуль» излишних срабатываний,

а при всех 9 видах несимметричных КЗ – правильное срабатывание.

15. Показано, что стандартные алгоритмы цифровой обработки сигналов на основе дискретного преобразования Фурье некорректно работают в условиях интергармоник и отклонений частоты, характерных для УПН (ошибка оценки амплитуды основной гармоники – до 11% при интергармониках, 12–18% – при отклонениях частоты 45–55 Гц). Впервые для задач защиты и автоматики предложено применение метода дизеринга в сочетании с малоразрядным квантованием: добавление к сигналу до квантования управляемого стохастического шума устраняет детерминированную связь ошибки квантования с сигналом и компенсирует ее при усреднении, при этом наибольший эффект дает именно малое число уровней квантования.

16. Результатами численного моделирования доказано, что сочетание малоразрядного квантования и дизеринга снижает ошибку оценки амплитуды сигнала с интергармониками с 11% до 0,425%, а при отклонении частоты до 45 Гц – с 18% до 0,1%, то есть до 26-кратного уменьшения погрешности. При применении дизеринга к задаче ОМП ВЛ 110 кВ флуктуационная ошибка 0,7 км, вызванная интергармоникой 125 Гц, сводится к нулю. Метод реализуется программно, без изменения аппаратной части терминалов.

17. Расчетно-экспериментальным путем, в том числе для реальной ВЛ 110 кВ (7 осциллограмм КЗ), установлено, что при однофазном КЗ на линии электропередачи с грозозащитным тросом переходное сопротивление в месте повреждения имеет активно-индуктивный характер (реактивное сопротивление порядка 1,5-1,6 Ом на модели), так как ток КЗ протекает через пробитый искровой промежуток и грозотрос. Показано, что погрешность стандартного одностороннего ОМП, основанного на допущении о чисто активном переходном сопротивлении, составляет 4-10% от длины ВЛ в расчетных условиях и превышает 50% в условиях реальных КЗ.

18. Для одно- и двухцепных ВЛ составлены квадратные уравнения (для двухцепных – системы уравнений с учетом взаимного сопротивления цепей) для решения задачи ОМП по прямой и нулевой последовательностям. Показано, что при неоднозначности решения приведение уравнений к каноническому виду позволяет однозначно определить место КЗ. При учете комплексного характера переходного сопротивления задача сведена к квадратному уравнению с комплексными коэффициентами без априорных предположений о характере сопротивления. Расчетами показано устранение систематической погрешности порядка 10%.

19. Для аппаратной верификации предложенных решений были разработаны два прототипа на базе контроллеров National Instruments CompactRio с программной реализацией в LabVIEW. Прототип системы диагностики искажений (метод двух измерений, фильтр Савицкого-Голея для пропуска малоинформативных выборок) при испытаниях с использованием

комплекса РЕТОМ-51 и лабораторной модели подтвердил корректное определение параметров схем замещения и коэффициентов влияния для всех исследованных типов присоединений.

20. Прототип усовершенствованного терминала дифференциальной защиты испытан в три этапа: на стандартных сигналах РЕТОМ-61 (установившийся режим, внешнее и внутреннее КЗ), на осциллограммах 25 наиболее тяжелых режимов насыщения ТТ из MATLAB Simulink, воспроизведенных в формате COMTRADE, а также на осциллограммах реальных аварий. По результатам испытаний получено «нуль» некорректных срабатываний при внешних КЗ в 25 режимах насыщения, время действия при внутренних КЗ не превысило 0,09 с, при этом испытания в режимах реальных аварий совпали с результатами имитационного моделирования. Показано, что предложенные усовершенствования защиты реализуются изменением алгоритма в терминалах без необходимости замены ТТ.

В обсуждении доклада и прениях выступили:

Илюшин П.В. (ФГБУН «ИНЭИ РАН», НП «НТС ЕЭС»), Шихин В.А. (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), Нагай В.В. (ООО НПП «РЕЛДОН», ООО «Энерго-Юг» «Южэнергосетьпроект»), Бык Ф.Л. (ФГБОУ ВО «НГТУ»), Куликов А.Л. (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), Мухлынин Н.Д. (ФГАОУ ВО «УрФУ»).

Илюшин П.В. – Председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС, руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «ИНЭИ РАН», д.т.н.

Обратил внимание, что предложенный в работе механизм дифференцированных штрафных надбавок требует дополнительного обоснования методики расчета величины штрафа. Вопрос определения того, с кого и в каком размере взимать компенсацию для установки соответствующих фильтрокомпенсирующих устройств, требует отдельной проработки.

Отметил, что помимо стоимости самих фильтрокомпенсирующих устройств существуют ограничения по местам их размещения на объектах сетевых компаний (свободные ячейки, площади), а также возникают сложности в ситуациях, когда на одном транзите искажения создаются разными по характеру нагрузок потребителями.

Задал вопрос о том, зависит ли величина сигнала дизеринга от уровня искажений в сети, остается ли она неизменной при подключении различных по характеру нагрузок (электрометаллургические комбинаты, тяговые нагрузки железных дорог и др.), и попросил пояснить, на основании чего была выбрана величина сигнала, равная половине шага квантования.

Обратил внимание на формулировку результатов на одном из слайдов, где погрешность определения места повреждения охарактеризована как «сведенная к нулю», и предложил уточнить, что речь идет именно о методической составляющей погрешности на математической модели линии электропередачи, поскольку получение нулевой погрешности в реальных условиях технически недостижимо с учетом нормируемых погрешностей измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Отметил, что ни одна кандидатская или докторская диссертация не может закрыть весь спектр задач научного направления, подчеркнул важность четкого разграничения решенных в диссертационной работе задач, а также задач, остающихся открытыми для дальнейших исследований – как самого автора, так и других ученых, работающих в данной научной области.

Шихин В.А. – Заведующий научной лабораторией «Оптимизация и автоматизация энергетических и технологических систем» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», к.т.н., доцент.

Обратил внимание, что при описании точности алгоритмов, использующих стохастический сигнал дизеринга, методологически корректнее оперировать не детерминированной величиной погрешности, а ее математическим ожиданием и иными интегральными вероятностными характеристиками, поскольку каждая реализация случайного сигнала уникальна при сохранении заданных статистических параметров.

Высказал мнение о работе как о достаточно цельной и завершенной, отметив при этом дискуссионный характер используемой в диссертации терминологии с точки зрения классической теории устойчивости нелинейных стохастических систем. Указал, что для существенно нелинейных систем принято различать устойчивость в малом, в большом и в целом, и поставил вопрос, не следует ли для большей строгости говорить о «стохастической устойчивости в целом», сближая формулировку с классическим аппаратом теории устойчивости, либо целесообразно сохранить предложенное автором понятие «устойчивости функционирования» как самостоятельную, устоявшуюся в работах по релейной защите категорию.

Нагай В.В. – Начальник отдела РЗ и ПА ООО НПП «РЕЛДОН», ведущий научный сотрудник филиала ООО «Энерго-Юг» «Южэнергосетьпроект», к.т.н.

Высоко оценил объем и содержательность представленной диссертационной работы, отметив постановку ряда важных задач и предложенных методов. Вместе с тем рекомендовал направить работу на рассмотрение практикующим специалистам по релейной защите (в частности, в организации чебоксарского кластера – НПП «ЭКРА», НПП «Бреслер», «Релематика», АО «ВНИИР» и др.), поскольку ряд затронутых в докладе

вопросов прорабатывался практическим сообществом релейщиков и может вызвать у них дополнительные вопросы.

Отметил, что дифференциально-фазный принцип традиционно применяется преимущественно на линиях электропередачи, тогда как для защиты трансформаторов, шунтирующих реакторов и синхронных генераторов более распространен дифференциальный токовый принцип с системой алгоритмов торможения и блокировок (по 2-й и 5-й гармоникам, пофазных и перекрестных), а вопросам насыщения ТТ, по его мнению, в отраслевой практике придается, возможно, чрезмерно большое значение относительно других факторов надежности оборудования.

Указал, что в практике эксплуатации релейной защиты используется устоявшийся набор из четырех показателей – надежность, селективность, чувствительность и быстродействие с нормируемыми методиками их расчета, тогда как термин «устойчивость функционирования» в инженерной практике употребляется реже и относится преимущественно к научной литературе. Предложил более подробно раскрыть в работе соотношение вводимого понятия устойчивости с классификацией действий защиты на правильные, ложные, излишние срабатывания и отказы, поскольку стоимость последствий каждого из этих исходов различна и зависит от наличия резервирования.

Высказал ряд предложений, требующих учета при практическом применении вероятностного метода расчета уставок, ввиду ограниченной достоверности исходных статистических данных о параметрах аварийных режимов. Отметил, что применяемые в эксплуатации методы расчета также не лишены методических допущений (не учитывают, например, действие автоматики регулирования возбуждения синхронных машин, поведение объектов ВИЭ при КЗ и др.).

Обратил внимание на необходимость разграничения понятий «погрешность» и «ошибка» при оценке точности расчетов.

Бык Ф.Л. – Доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» ФГБОУ ВО «НГТУ», к.т.н., доцент.

Отметил высокую практическую значимость работы применительно к узлам присоединения потребителей классов напряжения 35 кВ и ниже, где проблематика устойчивости защиты и автоматики стоит принципиально иначе, чем в объединенной энергосистеме, в том числе в связи с активным развитием распределенной генерации на этих уровнях напряжения и связанными с этим реверсивными перетоками мощности, которые традиционная однонаправленная релейная защита не способна обрабатывать.

Задал вопрос о приоритетности требований к защите узлов промышленной нагрузки (селективность, чувствительность, быстродействие) и обратил внимание на важность учета не только величины токов КЗ, но и

динамических моментов (в частности, при возможной потере динамической устойчивости синхронных генераторов небольшой мощности), рекомендовав уделить этому вопросу дополнительное внимание при описании условий применимости предложенных алгоритмов.

Задал вопрос о соотношении правильных, ложных и излишних срабатываний защиты в узлах промышленной нагрузки в количественном выражении, отметив в ходе обсуждения отсутствие в отрасли статистики и средств наблюдаемости на данных классах напряжения, что подтверждает актуальность рассматриваемой в диссертационной работе проблематики.

В заключительном выступлении отметил высокую актуальность работы, указав вместе с тем на ограниченность ее эмпирической и статистической базы как на объективное следствие отсутствия наблюдаемости и регистрации процессов в узлах промышленной нагрузки на сегодняшний день, а не как на недостаток самой работы.

Поддержал целесообразность введения экономических механизмов (штрафных надбавок), стимулирующих потребителей с источниками искажений к их устранению за счет установки собственных фильтрокомпенсирующих устройств в сетях внутреннего электроснабжения.

Куликов А.Л. – Профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», д.т.н., профессор.

Отметил содержательность и практическую направленность выступления В.В. Нагая, согласившись с тем, что ряд затронутых вопросов релейной защиты остается за рамками диссертационного исследования и подлежит дальнейшей проработке. Подчеркнул, что тема диссертационной работы сознательно сфокусирована на УПН, для которых, в отличие от сетевых объектов напряжением 110 кВ и выше, отсутствует комплексная нормативная база требований к релейной защите и автоматике (за частичным исключением системы тягового электроснабжения, где вопросы устойчивости рассматривались в работах Е.П. Фигурнова и др.), а многообразие и специфика режимов узлов промышленной нагрузки затрудняют выработку единой методологической базы по аналогии с сетевыми приложениями.

Отметил, что представленные в диссертации результаты стали следствием выполнения автором хоздоговорных работ по инициативе промышленных предприятий, сетевых и инжиниринговых компаний (в т.ч. из-за проблем эксплуатации защиты и автоматики на транзите Байкало-Амурской магистрали), а не за счет целевого государственного финансирования, что подчеркивает практическую востребованность полученных решений.

Как научный консультант, дал положительную характеристику соискателю, составу и качеству выполненной диссертационной работы, указав на возможные перспективные направления дальнейших исследований в рассматриваемой научной области.

Мухлынин Н.Д. – Доцент кафедры автоматизированных электрических систем ФГАОУ ВО «УрФУ», к.т.н., доцент.

Задал вопрос о применимости метода дизеринга не только для повышения точности оценки амплитуды сигнала, но и для оценки его углового положения (фазы), что актуально для направленных защит.

Задал ряд уточняющих вопросов по предложенному способу восстановления формы тока при насыщении ТТ по трем отсчетам: каким образом определяется момент начала аварийного режима, подлежащего восстановлению; применим ли способ, помимо дифференциальной защиты шин, к дифференциальной защите силового трансформатора; по какой причине в работе не решается задача восстановления апериодической составляющей на всем интервале, а не только на интервале трех используемых отсчетов.

Отметил, что при переходе к дифференциальным принципам на мгновенных значениях токов потребуется восстановление полной формы периодической составляющей сигнала.

Заслушав выступления экспертов по результатам дискуссии, совместное заседание 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 **отмечает**:

1. Натурными измерениями на реальных объектах Иркутской области и других регионов страны подтвержден систематический характер недопустимых искажений токов и напряжений в узлах промышленной нагрузки, что отличает их от электросетевых объектов общего назначения и обосновывает необходимость поиска специальных подходов к обеспечению устойчивого функционирования устройств защиты и автоматики на таких объектах.
2. Предложен и верифицирован на промышленных объектах метод определения влияния потребителей на искажения напряжения на основе понятий автономного напряжения искажения и коэффициента влияния, учитывающий неаддитивность напряжения искажения в узле нагрузки. На его основе предложен общий экономический механизм стимулирования потребителей к снижению вносимых искажений.
3. Разработана и апробирована на реальных данных система вероятностных критериев устойчивости защиты и критериев устойчивости ОМП в условиях искажений параметров режима, позволяющая объективно

сравнивать алгоритмы защиты и наборы уставок между собой, чего не обеспечивает применяемый в настоящее время нормативно-методический аппарат в области релейной защиты и автоматики.

4. Предложенное сочетание дифференциально-фазного органа и блокировки по апериодической составляющей дифференциального тока обеспечило на моделях дифференциальной защиты разных производителей полное устранение неселективных срабатываний при насыщении трансформаторов тока без потери быстродействия и чувствительности при внутренних КЗ, что имеет практическое значение для повышения надежности функционирования действующих устройств защиты и автоматики.

5. Впервые для задач цифровой обработки сигналов в устройствах защиты и автоматики применен метод дизеринга в сочетании с малоразрядным квантованием, обеспечивший снижение погрешности определения параметров искаженного сигнала до 26 раз. Метод реализуется программно, без изменения аппаратной части существующих терминалов защиты.

6. Экспериментально и расчетным путем установлен активно-индуктивный характер переходного сопротивления при однофазных КЗ на ВЛ с протеканием тока через грозозащитный трос. Разработаны и запатентованы методы одностороннего ОМП, позволяющий устранить связанную с этим фактором погрешность и неоднозначность решений, характерную для известных методов ОМП.

Совместное заседание 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 **решило**:

1. Рекомендовать техническому комитету по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика» и Минэнерго России рассмотреть вопрос об оформлении разработанной методики оценки влияния потребителей на несимметрию и несинусоидальность напряжения в формате нормативного документа. После его утверждения рассмотреть возможность закрепления в нормативно-правовой базе введение механизма дифференцированных штрафных надбавок к тарифу для потребителей, оказывающих недопустимое влияние на искажение напряжения, с целевым направлением собранных средств на централизованную установку фильтрокомпенсирующих устройств в узлах промышленной нагрузки для улучшения показателей качества электроэнергии.

2. Рекомендовать производителям устройств релейной защиты и автоматики, а также организациям, разрабатывающим технические требования к РЗА электрооборудования в узлах промышленной нагрузки, рассмотреть возможность реализации в программном обеспечении серийно выпускаемых терминалов релейной защиты и автоматики разработанных алгоритмов:

усовершенствованной дифференциальной защиты с дифференциально-фазным органом и блокировкой по апериодической составляющей, модифицированной токовой защиты обратной последовательности с учетом углового критерия, метода дизеринга с малоразрядным квантованием для цифровой обработки искаженных сигналов. Отметить, что корректная работа перечисленных алгоритмов требует частоты дискретизации не менее 80 отсчетов на период и применения измерительных преобразователей, корректно воспроизводящих апериодическую составляющую тока КЗ.

3. Рекомендовать разработчикам программного обеспечения и методик ОМП на ВЛ учитывать возможность активно-индуктивного характера переходного сопротивления при однофазных КЗ на ВЛ с грозозащитным тросом, а также рассмотреть возможность применения разработанных способов одностороннего ОМП, устраняющих связанную с этим фактором систематическую погрешность и неоднозначность решения, вызванную допущением о чисто активном характере переходного сопротивления.

4. Рекомендовать АО «СО ЕЭС», ПАО «Россети» и другим организациям, формирующим отраслевую нормативно-техническую базу по релейной защите и автоматике, рассмотреть возможность использования вероятностных критериев устойчивости защиты в дополнение к уже известному набору свойств и критериев при проектировании и выборе алгоритмов защиты для объектов с повышенным уровнем фоновых искажений. Рекомендовать учитывать фактические уровни фоновых искажений токов и напряжений, определяемые по результатам измерений в узлах промышленной нагрузки, при выборе уставок и алгоритмов защиты и автоматики на стадии проектирования и при последующей корректировке в процессе эксплуатации.

С заключительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н. Илюшин П.В., в котором отметил, что в основе рассмотренной работы лежит значительный объем фактического материала – натурные испытания и измерения, выполненные автором на реальных объектах, что позволило корректно сформулировать задачи, стоящие перед современными системами промышленного электроснабжения. Подчеркнуто, что переход от применения синхронных генераторов в узлах промышленной нагрузки к источникам электроэнергии на базе силовой преобразовательной техники, а также широкое применение устройств силовой электроники в энергопринимающих устройствах (частотно-регулируемый привод; устройства плавного пуска; источники бесперебойного питания и др.) носит долгосрочный, структурный характер. В связи с этим задача обеспечения устойчивого функционирования защиты и автоматики в условиях искажений токов и напряжений будет сохранять актуальность на протяжении всего жизненного

цикла новых поколений устройств защиты, применяемых как в узлах промышленной нагрузки, так и в системах внутреннего электроснабжения промышленных предприятий. Отмечена необходимость взаимодействия с ведущими научными школами в области релейной защиты и автоматики, в том числе профильными предприятиями г. Чебоксары, а также Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, Южно-Российского государственного политехнического университета им. М.И. Платова, Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина с целью получения обратной связи по затронутым в работе вопросам и определения направлений дальнейших научных исследований.

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.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
электроэнергии и распределенные
энергетические ресурсы»
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.

_____ Д.А. Ивановский