



**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

«23» ноября 2021 г.

ПРОТОКОЛ № 7

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: **«Комплекс технических
решений для повышения надежности и экономичности функционирования
объектов распределенной энергетики»**

15 ноября 2021 года

г. Москва

Присутствовали: члены секции «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», сотрудники
НП «НТС ЕЭС», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», НИК С6 РНК СИГРЭ, ФГБУН «ИИЭИ
РАН», ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный технический университет», ГБОУ ВО
«Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»,
ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева», ООО НПП «ЭКРА»,
ООО «Интеллэнергия», ООО «РТСофт-СГ», Комитет ВИЭ РосСНИО, ООО
«ВИЭСХ ВИЭ», всего **47** 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 в России на протяжении последнего десятилетия массово внедряются объекты распределенной генерации и распределенной энергетики на базе когенерационных установок. Интеграция указанных объектов в энергосистемы и изолированные энергорайоны имеет свои специфические особенности, обусловленные малыми значениями механических постоянных инерции применяемых генерирующих установок, малыми запасами по механической прочности и термической стойкости, уставками устройств релейной защиты, технологической автоматики, а также алгоритмами работы систем автоматического управления/регулирования. Развитие распределенной энергетики промышленными предприятиями содействует приближению генерирующих установок к электродвигателям в системах электроснабжения, что приводит к тому, что переходные процессы для них становятся общими, а характеристики процессов определяется, в том числе, параметрами электродвигателей, учитывая сопоставимые мощности и малые взаимные сопротивления. В этих условиях требуется в рамках проектов осуществлять разработку комплексов технических решений, которые позволили бы обеспечить надежность и экономичность функционирования объектов распределенной энергетики в составе энергосистем и изолированных энергорайонов. Следовательно, рассматриваемая на сегодняшнем совместном заседании секций тема является крайне актуальной.

С докладом «**Комплекс технических решений для повышения надежности и экономичности функционирования объектов распределенной энергетики**» выступил Горожанкин Павел Алексеевич, к.т.н., главный специалист по перспективным разработкам ООО МНПП «АНТРАКС».

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

1. Ключевыми факторами, которые определяют необходимость использования установок собственной распределенной генерации – это повышение надежности электроснабжения электроприемников и уменьшение затрат на энергоснабжение. Соответственно, если генерирующие установки эксплуатируются в неоптимальном режиме и/или не приняты специальные меры по обеспечению их устойчивости при возмущениях, то указанные цели или вообще не будут достигнуты или будут достигнуты, но частично:

- 1.1. Увеличение затрат при неоптимальном управлении обусловлено:
 - 1.1.1. Затратами установившегося режима:
 - увеличенные затраты на топливо (генерирующие установки работают

не с максимально возможным КПД; выдача излишней электроэнергии осуществляется в энергосистему в связи с неуправляемым перетоком мощности);

– увеличенные затраты на покупку электроэнергии, обусловленные неуправляемым перетоком мощности из энергосистемы в систему внутреннего электроснабжения предприятия.

При этом данная проблема усугубляется из-за роста стоимости топлива и электроэнергии.

1.1.2. Затратами из-за потери устойчивости при возмущениях:

- сокращение межремонтного периода (кол-во пусков за межремонтный период ограничено);
- дополнительные потери, обусловленные недоотпуском продукции из-за обесточения на время повторного запуска генерирующих установок;
- дополнительные затраты на топливо для повторного запуска генерирующих установок.

Проблема усугубляется постепенным снижением надежности прилегающих распределительных сетей 6-10 кВ, вследствие их старения, что сопровождается ростом параметра потока отказов.

1.1.3. Увеличением затрат на создание и эксплуатацию систем собственной распределенной генерации:

- отсутствие относительно недорогих серийных систем режимной и противоаварийной автоматики;
- увеличение стоимости проектирования при моделировании режимов для всех возможных схемно-режимных ситуаций;
- увеличенная стоимость проведения пуско-наладочных работ;
- увеличенные эксплуатационные затраты из-за привлечения высококвалифицированного персонала для эксплуатации устройств режимной и противоаварийной автоматики.

Следствием данного положения является то, что даже относительно простые системы управления эксплуатируются в неоптимальных режимах, а в условиях снижения надежности внешних распределительных сетей это приводит к существенному росту количества аварийных остановов генерирующих установок на объектах распределенной генерации.

1.2. Задача ведения оптимального режима осложняется необходимостью соблюдения имеющихся ограничений:

1.2.1. Предотвращение выхода cosφ генераторов за заданный диапазон:

- $\cos\phi < 0,9$ (обеспечение устойчивости; равномерный прогрев статора и ротора, что содействует продлению ресурса генераторов);
- $\cos\phi > 0,7$ (предотвращение работы приводного двигателя с низким

КПД из-за невозможности загрузки генератора по активной мощности);

– предотвращение выхода рабочей точки генераторов за пределы PQ -диаграммы: величины активной и реактивной мощности генератора являются взаимозависимыми:

– при отсутствии дефицита генерируемой мощности возможен выход на режим установленного нулевого перетока с энергосистемой;

– при дефиците реактивной мощности на предприятии должен обеспечиваться минимальный переток реактивной мощности из энергосистемы и нулевой по активной мощности;

– при дефиците активной мощности должен обеспечиваться минимально возможный переток из энергосистемы по активной мощности и нулевой переток по реактивной мощности.

1.2.2. Предотвращение недопустимых отклонений напряжения на шинах генераторов.

1.2.3. Предотвращение работы генераторов с нагрузкой менее 20 – 50% (особенно критично для приводных газопоршневых и дизельных двигателей).

1.2.4. Предотвращение перегрузки питающей воздушной (ВЛ) или кабельной линии электропередачи (КЛ) в связи с превышением максимально допустимой нагрузки.

1.2.5. Выполнение технических условий на подключение к энергосистеме:

– нулевой переток реактивной мощности в сторону энергосистемы (в режиме избытка генерации);

– поддержание требуемого $\text{tg}\phi$ (в режиме дефицита мощности).

1.2.6. Минимизация межсекционных перетоков (повышение устойчивости при отключении межсекционных выключателей).

В рассматриваемых условиях стоит задача создания комплекса программно-технических средств, обеспечивающего решение задачи многокритериальной оптимизации в системе нескольких взаимозависимых переменных с заданными ограничениями.

Отметим несколько особенностей сформулированной задачи:

– для обеспечения единственности решения должны быть заданы весовые коэффициенты для всех критериев оптимизации;

– часть задач, которые полностью определяются текущими режимными параметрами, может быть решена одним из методов многокритериальной оптимизации – например, методом квадратичного программирования (поиск n -мерного вектора X , который минимизирует $(x^T Q x + c^T x)$ при условии $Ax < b$, где x^T – транспонированный вектор, $Ax < b$ – означает, что любой элемент вектора Ax не превосходит соответствующего элемента вектора b);

- часть задач, в которых алгоритмы между входными и выходными параметрами не могут быть выражены аналитически и зависят от времени, целесообразно решать методами нейросетевого анализа, в том числе, с упреждающими воздействиями;
- задача режимной оптимизации хотя и требуют больших вычислений, но, с учетом быстродействия современных процессоров, не считается критичной по времени.

2. Задача обеспечения устойчивости генерирующих установок при возмущениях.

2.1. Постановка задачи: выравнивание генерируемой и потребляемой активной и реактивной мощности для группы генерирующих установок и нагрузок (минимально – в объеме одной секции распределительного устройства 6 (10) кВ).

2.2. Основные алгоритмические задачи противоаварийной автоматики:

2.2.1. Автоматика ограничения дефицита мощности:

– причины: аварийное отключение генерирующей установки, включение мощной нагрузки, отключение вводного и/или секционного выключателя при перетоке мощности из энергосистемы в рассматриваемый энергорайон;

– контрмеры: симметричное отключение неответственных нагрузок.

2.2.2. Автоматика ограничения избытка мощности:

– причины: аварийное отключение нагрузки в результате КЗ на присоединении, отключение вводного и/или секционного выключателя;

– контрмеры: подключение балластной нагрузки, отключение генерирующих установок.

2.2.3. Автоматика обеспечения устойчивости при кратковременных нарушениях электроснабжения:

– причины: КЗ на питающей ВЛ с успешным АПВ (около 85% всех кратковременных нарушений электроснабжения имеют продолжительность менее 0,5 с);

– контрмеры: подключение балластной нагрузки (при избытке мощности).

2.2.4. Автоматическое отключение (отделение) от энергосистемы:

– причины: аварии в энергосистеме, аварийное отключение питающей ВЛ (КЛ);

– контрмеры: подключение импульсной нагрузки и/или отключение генерирующих установок (при избытке генерации), отключение неответственных нагрузок (при дефиците генерации).

2.3. Рассмотрим некоторые важные особенности функционирования

устройств противоаварийной автоматики:

- дефицит времени на реализацию контрмер (учитывая малые моменты инерции генерирующих установок и собственное время отключения выключателей, это время составляет не более 20 – 40 мс);
- малое время на срабатывание устройств противоаварийной автоматики обусловлено в большинстве случаев еще и тем обстоятельством, что через 0,1 – 0,2 с автоматически отрабатывают первичные регуляторы активной и реактивной мощности генерирующих установок.

3. В качестве датчиков и вспомогательных устройств для системы противоаварийной автоматики предлагается использовать:

3.1. Датчики мгновенного углового положения роторов генерирующих установок, например, компании BAUMER (бесконтактные датчики с магнитным считыванием имеют характеристики: разрешение: 0,35 – 1,4 град, стоимость: 16 – 25 тыс. руб., степень защиты: IP67, температурный диапазон: от -40 до +85 °C, время отклика: 2 мс);

3.2. Контроллеры, вычисляющие мгновенное значение угла нагрузки генераторов (например – ЭНИП-2, которые на основании кривой напряжения и сигналов датчика углового положения ротора определяют угол нагрузки генератора, его 1-ю и 2-ю производные, а также мощность генератора);

3.3. Импульсная нагрузка, подключаемая при избытке мощности (поглощение энергии осуществляется только за счет теплоемкости нагрузочного сопротивления из нихрома. Процесс адиабатический ввиду кратковременности. При удельной теплоемкости нихрома 450 Дж/кг/К, максимальной температуре нагрева 1000 °C и массе балластного сопротивления 200 кг, получаем максимальную поглощаемую энергию за цикл 90 МДж).

3.4. Структура системы противоаварийной автоматики предлагается следующей:

– контроллеры противоаварийной автоматики (ЭНИП), установленные в ячейках генераторов, при резком изменении угла нагрузки генератора, формируют GOOSE-сообщения, обеспечивающие отключение (включение) соответствующей мощности нагрузки;

– контроллеры ЭНИП, установленные в ячейках неответственных нагрузок, нагрузочных сопротивлений и секционных (вводных) выключателей, принимая GOOSE-сообщения, отключают соответствующие выключатели.

3.5. Перечень GOOSE-сообщений, формируемых ЭНИП: аварийное отключение генератора с $P_0 = 0,2/0,4/0,6/0,8/1,0 P_{\text{ном}}$, аварийное отключение генератора с $Q_0 = 0,2/0,4/0,6/0,8/1,0 Q_{\text{max}}$, аварийное отключение нагрузки с различным значением нагрузки в исходном режиме – P_0 , знак и величина перетока мощности через секционный (вводной) выключатель,

ускорение/замедление генератора (формируются разные GOOSE-сообщения).

3.6. Перечень функций, реализуемых в контроллерах ЭНИП:

- формирование команды на аварийное отключение/включение выключателя;
- контроль положения выключателя и выкатного элемента;
- вычисление угла нагрузки генератора и его 1-й и 2-й производных;
- прием и формирование GOOSE-сообщений с контролем времени доставки GOOSE-сообщений.

4. Основные алгоритмы режимной автоматики были реализованы и проверены в течении 7 лет на системах автоматического управления мощностью газотурбинной электростанции на Каменном лицензионном участке КНГМ (Ханты-Мансийский автономный округ).

В обсуждении доклада и прениях выступили: Илюшин П.В. (председатель секции), Удинцев Д.Н. (ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»), Фишов А.Г. (ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»), Гусев Ю.П. (ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»), Рабинович М.А. (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»), Крупенев Д.С. (ФГБУН «ИСЭМ СО РАН»).

Удинцев Д.Н. – Профессор кафедры «Электроэнергетические системы» ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», д.т.н., доцент.

Обратил внимание, что одним из проблемных вопросов, связанных с эксплуатацией объектов распределенной генерации в энергорайонах со слабыми электрическими связями, является резкий наброс нагрузки в результате КЗ, приводящий к переходу генерирующих установок в асинхронный режим.

Отметил, что одним из способов, позволяющим предотвращать переход генерирующих установок в асинхронный режим, является увеличение потребляемой внутри энергорайона активной мощности. Однако этот способ возможно реализовать при плановом диспетчерском пуске оборудования.

Обратил внимание, что при проектировании ЛЭП напряжением 6-20 кВ при выборе сечения проверка по критерию устойчивости, согласно требованиям нормативно-технических документов, не производится. Однако в связи с ростом количества объектов распределенной генерации при выборе сечения ЛЭП следует производить проверку по критерию устойчивости.

Фишов А.Г. – Профессор кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», д.т.н., профессор.

Обратил внимание, что одним из результатов оптимизации режимов

работы генерирующего оборудования является продление его эксплуатационного ресурса.

Отметил, что методики количественной оценки снижения эксплуатационного ресурса генерирующего оборудования, в зависимости от времени его работы в тяжелых режимах, на данный момент отсутствуют.

Обратил внимание, что одним из оптимальных подходов в области противоаварийного и режимного управления объектами распределенной генерации является их выделение на сбалансированную нагрузку при возмущениях в прилегающей распределительной сети.

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

Отметил, что генерирующие установки с малым моментом инерции, например, газопоршневые и газотурбинные, при переходе в асинхронный режим могут вовлечь в него и более инерционные машины, находящиеся в непосредственной электрической близости от них.

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

Обратил внимание, что в программно-аппаратных комплексах для моделирования электрических режимов PQ -диаграмма генерирующих установок, как правило, задается.

Отметил, что при расчете динамической устойчивости на базе отечественных программно-аппаратных комплексов расчетные значения параметров электрического режима и фактические значения у генерирующих установок большой мощности коррелировались, однако подобные оценки для объектов распределенной генерации не проводились.

Крупенев Д.С. – заведующий лабораторией надёжности топливо- и энергоснабжения ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», к.т.н., доцент.

Обратил внимание, что методы нелинейного программирования были эффективно использованы в системах управления реактивной мощностью и напряжением в энергосистемах России.

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

Обратил внимание, что расчеты динамической устойчивости могут проводиться в отечественном программно-аппаратном комплексе RUSTAB, а

расчет параметров установившихся режимов в ПК RastrWin.

Отметил, что целесообразно провести анализ использования методов нелинейного программирования, а также нейросетей для задач повышения надежности эксплуатации и эффективности управления объектами распределенной генерации с целью их дальнейшего применения на генерирующих установках большой мощности.

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. Для объектов собственной распределенной генерации весьма важным является оптимальное ведение режима по активной и реактивной мощности, а также наличие противоаварийной автоматики (особенно при параллельной работе с энергосистемой), в противном случае эффективность собственной генерации, как альтернативы сетевому присоединению, существенно снижается.

2. Задача оптимального ведения установившегося режима должна выполняться как многокритериальная задача поиска функции нескольких переменных с заданными ограничениями. Весьма важным здесь является учет всех возможных схемно-режимных ситуаций, в том числе, предшествующих аварийному отключению (отделению) от энергосистемы. Для отдельных задач представляется целесообразным использование прогностической оптимизации, с учетом временного фактора на основе технологии нейронных сетей.

3. Задача обеспечения устойчивости при различных возмущениях является задачей противоаварийной автоматики, которая в данном случае может эффективно решаться с использованием непрерывного контроля угла нагрузки генераторов и формированием на основе этого параметра состава управляющих воздействий противоаварийной автоматики.

4. Предложенный способ демпфирования возмущений с использованием импульсной нагрузки, обеспечивающей кратковременное (до момента отработки собственных регуляторов мощности генерирующих установок) увеличение нагрузки является эффективным, недорогим и может быть использован на большинстве объектов распределенной генерации.

5. Представляется интересным, достаточно простым и эффективным решение по реализации системы управления режимами в сетях электроснабжения предприятий с объектами распределенной генерации на основе использования GOOSE-сообщений.

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 детализировать алгоритмы и технические решения по режимной и противоаварийной автоматике на основе использования GOOSE-сообщений и представить данный вопрос в отдельном докладе на заседании секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС».
2. Рекомендовать автору продолжить исследования в области применения предложенного способа контроля мгновенного значения угла нагрузки генерирующих установок, с целью его использования в составе комплексов противоаварийной автоматики электростанций большой мощности.
3. Рекомендовать организациям, занятым вопросами проектирования, строительства и ввода в эксплуатацию объектов распределительного сетевого комплекса, при выборе сечений ЛЭП, питающих энергорайона с распределенной генерацией, производить их проверку по критерию устойчивости.
4. Рекомендовать собственникам объектов распределенной генерации рассмотреть возможность использования предложенных в докладе технических решений по противоаварийной и режимной автоматике с целью повышения надежности и экономичности их функционирования.
5. Рекомендовать проектным организациям при разработке технических решений по противоаварийной и режимной автоматике для объектов распределенной генерации использовать представленные в докладе технические решения, имеющие положительный опыт эксплуатации на действующих объектах, а также инновационные решения и предложения, которые позволят решить ряд актуальных вопросов.

С заключительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», д.т.н. Илюшин П.В., в котором отметил, что при интеграции новых объектов распределенной генерации не редко возникают совершенно новые проблемные технические вопросы и задачи, которые необходимо оперативно решать, корректируя первоначальные проектные решения. Кроме того, при интеграции генерирующих установок с новыми технологическими особенностями важно обобщать опыт их эксплуатации, с целью корректной разработки последующих проектов их технологического присоединения, учитывая особенностей построения отечественных распределительных сетей. Важным является вопрос применения устройств силовой электроники

(например, динамических компенсаторов), с помощью которых возможно решение ряда проблемных аспектов, связанных с провалами или прерываниями напряжения на вводах особо ответственных электроприемников промышленных предприятий. Актуальной остается задача использования нейросетей при создании эффективных систем противоаварийного и режимного управления в сетях с объектами распределенной генерации. Учитывая вышеизложенное, представляется целесообразным осуществлять отработку новых современных подходов к созданию систем противоаварийного и режимного управления, а также инновационных технических решений по применению систем накопления электрической энергии, динамических компенсаторов и др. на объектах распределенной генерации, с целью их последующего возможного тиражирования на крупных объектах электроэнергетики.

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



V.B. 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