



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

109044 г.Москва, Воронцовский пер., дом 2  
Тел. (495) 912-1078, 912-5799, факс (495) 632-7285  
E-mail: [dtv@nts-ees.ru](mailto:dtv@nts-ees.ru), <http://www.nts-ees.ru/>  
ИНН 7717150757

**УТВЕРЖДАЮ**

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

  
\_\_\_\_\_ Н.Д. Роголев

«24» мая 2019 г.

## **ПРОТОКОЛ № 5**

совместного заседания секций «Активные системы распределения  
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» и  
«Электротехническое оборудование» НП «НТС ЕЭС»

для рассмотрения доклада по теме:

**«Применение высоковольтных полупроводниковых устройств для  
интеграции генерирующих установок распределенной генерации в  
распределительную сеть»**

23 мая 2019 года

г. Москва

**Присутствовали:** члены секций «Активные системы распределения  
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» и  
«Электротехническое оборудование» НП «НТС ЕЭС», сотрудники ФГБОУ ВО  
«НИУ МЭИ», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», АО «СО ЕЭС», филиала «Русатом –  
Электротехника», АНО «НИЦ АТМОГРАФ», АО «Техническая инспекция  
ЕЭС», ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», ФГУП «Центральный аэрогидродинамический  
институт им. Н.Е. Жуковского», НП «НТС ЕЭС», всего 18 чел.

Со вступительными словами выступили председатель секции «Активные  
системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические  
ресурсы», проректор по научной работе ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», к.т.н. Илюшин  
П.В. и председатель секции «Электротехническое оборудование», научный  
руководитель АО «НТЦ ФСК ЕЭС», д.т.н., профессор Шакарян Ю.Г.

Во вступительных словах отмечено, что в настоящее время в  
отечественной электроэнергетике наблюдается устойчивый рост в  
технологическом присоединении генерирующих установок (ГУ), относящихся к  
объектам распределенной генерации (далее – РГ), в том числе тех, которые

присоединяются к электрической сети через электротехнические устройства с элементами силовой электроники (инверторных преобразователей).

Обратили внимание, что на рынке электротехнического оборудования в настоящее время представлен широкий спектр устройств с элементами силовой электроники разных заводов-изготовителей, как зарубежных, так и отечественных, имеющих различные технические характеристики и алгоритмы управления, а также особенности интеграции и эксплуатации.

Отметили, что одной из важных задач в области интеграции ГУ объектов РГ в энергосистему, посредством электротехнических устройств с элементами силовой электроники, является возможность управления электрическими режимами, в различных схемно-режимных условиях.

Обратили внимание, что в последнее время наблюдается рост количества аварийных отключений в распределительных сетевых компаниях, которые связаны со значительным износом электросетевого оборудования. Поэтому, интеграция в распределительные сети электротехнических устройств с элементами силовой электроники не должна ухудшать условия эксплуатации другого оборудования распределительных сетевых компаний, а также создавать сложности с обеспечением селективной работы устройств релейной защиты.

В связи с этим вопросы, связанные с моделированием ГУ объектов РГ, присоединяющихся к энергосистеме с помощью электротехнических устройств с элементами силовой электроники, а также особенностями выполнения расчетов электрических режимов в проектах интеграции таких ГУ, представляют особую актуальность.

С докладом **«Применение высоковольтных полупроводниковых устройств для интеграции генерирующих установок распределенной генерации в распределительную сеть»** выступил начальник отдела развития энергетических систем в г. Екатеринбурге АО «НТЦ ЕЭС (Московское отделение)» Симонов А.В.

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

1. Отмечено, что доклад нацелен на ознакомление слушателей со сравнительным анализом применения генерирующего оборудования, подключенного к электрической сети через вставку постоянного тока (далее – ВПТ), в сравнении с подключением «классического» оборудования распределенной генерации. Обращено внимание на преимущества и недостатки использования ВПТ.

2. Обращено внимание, что в настоящее время наблюдается тенденция роста и развития объектов РГ с различным видом первичного источника энергии: ГПУ, ГТУ, СЭС, ВЭС, мини-ГЭС, накопители электроэнергии. В связи

с этим, актуальным является вопрос интеграции вышеуказанных источников в распределительную сеть.

Для решения данного вопроса применяются технические устройства, построенные на современной полупроводниковой базе:

- инверторы;
- вставки постоянного тока (далее ВПТ).

3. Представлена информация о достижениях в развитии высоковольтной силовой электроники. Отмечены следующие:

- диоды имеют параметры по обратному напряжению до 10 кВ, номинальному току до 10 кА;
- традиционный тиристор (SCR) по напряжению до 8,5 кВ, номинальному току до 5,5 кА;
- запираемый тиристор (GTO) по напряжению до 6 кВ, номинальному току до 4,0 кА;
- запираемый тиристор (IGCT) по напряжению до 6 кВ, номинальному току до 4,0 кА;
- биполярный транзистор (IGBT) по напряжению до 4,5 кВ, номинальному току до 3,0 кА.

Ведущими зарубежными фирмами в области силовой электроники, в частности – силовых модулей последних поколений – являются «Motorola» (США), «Siemens» (Германия), «Mitsubishi» (Япония), «Semikron» (Германия), IR («International Rectifier», США), «ABB» (Шведская компания).

4. Отмечено, что для построения силового инверторного оборудования в основном применяются:

- запираемый тиристор IGCT;
- биполярный транзистор IGBT.

5. Обращено внимание, что вышеуказанные полупроводниковые приборы имеют существенные преимущества по сравнению с другими по следующим показателям:

- высокая частота переключений;
- не энергоёмкость системы управления.

6. Представлены, регламентирующие технические требования к инверторному оборудованию:

- ГОСТ 24376-91 «Инверторы полупроводниковые. Общие технические условия»;
- Постановление Правительства РФ от 13.08.2018 №937 «Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты

Правительства Российской Федерации» (в части подключения вновь вводимого генерирующего оборудования).

7. Отмечено, что представленные регламентирующие документы не содержат исчерпывающий перечень требований к оборудованию, построенному на базе высоковольтных полупроводниковых приборов.

8. Представлена следующая информация:

- о схемотехнике построения инверторного оборудования;
- о схемотехнике построения двухсторонних вставок постоянного тока;
- о возможности реализации законов регулирования инверторного оборудования в контроллерах.

9. Представлены сравнительные характеристики классического синхронного генератора, обычно используемого в распределительных сетях, и генератора, подключенного через ВПТ.

10. Представлены результаты сравнительного анализа расчетов электромеханических переходных процессов, выполненных в программном комплексе PowerFactory для различных объектов РГ:

- с применением ВПТ (разным законом регулирования: по напряжению, по току),
- с применением «классического» синхронного генератора (с различной системой возбуждения (shunt, PMG) на примере подключения РГ в реальную сеть одного из крупных предприятий.

11. Отмечена эффективность использования ВПТ, инверторных устройств для интеграции оборудования в электрическую сеть с законом регулирования по изменению напряжения. При этом в случае применения РГ для электроснабжения изолированного района, или выделения на изолированный район, необходимо дополнительно обеспечить реализацию закона регулирования по изменению активной мощности от изменения частоты.

12. Обращено внимание на преимущества подключения объектов РГ через ВПТ:

- отсутствие необходимости установки устройств синхронизации;
- отсутствие необходимости в сохранении устойчивости самой распределенной генерации при любых внешних нормативных возмущениях, и как следствие – не требуется установка дополнительных устройств ПА типа АПНУ, АЛАР;
- исключается отключение генерирующего оборудования технологическими защитами при близких КЗ с просадкой напряжения ниже 20 % от Уном и длительностью более 200 миллисекунд;
- из-за того, что инверторное оборудование ограничивает выходной ток

до величины  $I = 1,2I_{\text{ном}}$  за 20 миллисекунд, генерация, подключенная через ВПТ, практически не влияет на величину токов короткого замыкания в узле. Кроме того, благоприятное влияние отражается в отсутствии ударных токов, и, как следствие, в отсутствии ударных моментов вращения на первичный генератор.

- быстрое действие систем регулирования: быстрее, чем у «классического» исполнения.

- возможность использования привода с переменной частотой вращения, что, в свою очередь, повышает эффективность и КПД первичного двигателя.

### 13. Отмечены недостатки подключения объектов РГ через ВПТ:

- зачастую, величина мощности (МВА) инверторного оборудования выбирается по активной мощности первичного источника электроэнергии. Учитывая круговую PQ-диаграмму инвертора, выдача номинальной активной мощности возможна только при  $\cos\varphi=1$ , тем самым ограничиваются возможности использования реактивной мощности без снижения активной мощности;

- небольшая величина токов короткого замыкания от инверторного оборудования требует усложнения работы устройств РЗА;

- в отдельных случаях может проявляться несинусоидальность, особенно при низкой нагрузке инверторного оборудования.

**В обсуждении доклада и прениях выступили:** Шакарян Ю.Г. (председатель секции), Илюшин П.В. (председатель секции), Новиков Н.Л., Рабинович М.А. (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»), Тягунов М.Г., Шихин В.А. (ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»), Николаев В.Г. (АНО «НИЦ АТМОГРАФ»), Щепетков С.К. (АО «Техническая инспекция ЕЭС»), Родионов В.А. (филиал «Русатом – Электротехника»), Игнатъев С.Г. (ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»).

С экспертными заключениями по тематике доклада **выступили:**

**Шакарян Ю.Г.** – Председатель секции «Электротехническое оборудование», научный руководитель АО «НТЦ ФСК ЕЭС», д.т.н., профессор.

Отметил положительный опыт технологического присоединения к электрической сети ГУ объектов РГ с частотой вращения турбины порядка 200 Гц, посредством электротехнических устройств с элементами силовой электроники. При этом стоимость проекта возрастала, по отношению к «классической» схеме не более чем на 20%.

Обратил внимание, что при оценке стоимости проектов интеграции ГУ

объектов РГ с применением электротехнических устройств с элементами силовой электроники, необходимо учитывать постоянные и переменные издержки в определенный период времени.

Отметил, что снижение стоимости проекта интеграции ГУ объектов РГ посредством электротехнических устройств с элементами силовой электроники по отношению к «классической» схеме присоединения может достигаться за счет уменьшения массогабаритных характеристик генератора.

Обратил внимание, что за счет изменения количества оборотов приводного газотурбинного двигателя возможно обеспечить повышение КПД ГУ и экономии топлива в объеме не менее 5–6%.

Отметил, что при проектировании объектов РГ целесообразно рассматривать возможность применения как синхронных, так и асинхронизированных синхронных генераторов, обладающих существенными преимуществами в части сохранения динамической устойчивости при внешних возмущениях.

**Новиков Н.Л.** – Заместитель научного руководителя АО «НТЦ ФСК ЕЭС», д.т.н., профессор.

Обратил внимание, что для достижения максимального эффекта при проектировании и интеграции ГУ объектов РГ, необходимо комплексно рассматривать все технологические процессы, происходящие в рассматриваемой энергосистеме.

Отметил, что при решении задачи повышения надежности электроснабжения потребителей от объектов РГ также необходимо обеспечить надежность выдачи мощности ГУ объектов РГ.

Обратил внимание, что при интеграции в энергосистему объектов РГ, в том числе в изолированные энергорайоны, целесообразно рассматривать возможность применения накопителей электроэнергии для решения различных прикладных задач.

**Тягунов М.Г.** – Профессор кафедры гидроэнергетики и ВИЭ ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», д.т.н. профессор.

Обратил внимание, что в московской энергосистеме находится значительное количество объектов РГ мощностью до 25 МВт, имеющих проблемы с выдачей мощности в энергосистему.

Отметил, что в настоящее время отсутствуют нормативные документы по технико-экономическому обоснованию применения на объектах РГ ГУ с электротехническими устройствами на базе элементов силовой электроники.

**Шихин В.А.** – Заведующий лабораторией ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», к.т.н., доцент.

Обратил внимание, что помимо применения синхронных генераторов с преобразователем частоты, имеется возможность использования на объектах РГ, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии, асинхронных генераторов, при этом техническое решение остается прежним, а с учетом особенностей работы асинхронного генератора, мощность преобразователя частоты снижается.

Отметил, что в связи с тем, что мощность преобразователя частоты небольшая, но достаточная для асинхронного генератора, имеется запас по динамической устойчивости что, как следствие, снижает вероятность отключения генератора при внешних возмущениях.

Обратил внимание, что применение асинхронных машин на ГУ объектов РГ целесообразно как с учетом их технических характеристик, так и экономических показателей, в сравнении с синхронными машинами.

**Николаев В.Г.** – Директор НИЦ «Атмограф», д.т.н.

Обратил внимание, что применение инверторных преобразователей на ГУ объектов РГ, интегрируемых в электрическую сеть 0,4 кВ, позволяет повысить КПД данных установок.

Отметил, что при интеграции ГУ объектов РГ в электрическую сеть необходима детальная проектная проработка всех возможных технических решений, позволяющая обосновать целесообразность применения ГУ с инверторными преобразователями.

Обратил внимание, что в настоящее время отсутствуют методические рекомендации по выбору и типовые технические решения по использованию ГУ с инверторными преобразователями.

**Щепетков С.К.** – Советник Генерального директора АО «Техническая инспекция ЕЭС».

Обратил внимание на наличие проблем при синхронизации с энергосистемой ГУ объектов РГ малой мощности (длительная синхронизация) в часы пиковой нагрузки, когда в значительной мере проявляется нестационарность параметров режима, с их отклонением за пределы уставок автоматического синхронизатора.

Отметил, что при ограничении температуры в камере сгорания ГТУ типа 009М до 950°С наблюдалось снижение КПД ГУ до 30%, что существенно снижало экономическую эффективность реализации проекта строительства объекта РГ.

Обратил внимание, что электротехнические устройства с элементами силовой электроники целесообразно применять при интеграции в энергосистему индукторных генераторов с частотой вращения турбины не связанной с режимом работы энергосистемы.

**Илюшин П.В.** – Председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», проректор по научной работе ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», к.т.н.

Обратил внимание, что применение электротехнических устройств с элементами силовой электроники эффективно при технологическом присоединении ВЭС, СЭС, а также ГУ объектов РГ в энергорайонах со слабыми внешними связями.

Отметил, что в настоящее время отсутствуют верифицированные статистические данные по параметрам потока отказов для возможности оценки элементной надежности как ГУ объектов РГ, так и электротехнических устройств с элементами силовой электроники, чтобы проводить при проектировании сравнение возможных вариантов на основе технико-экономического обоснования.

Обратил внимание, что каждая изолированная энергосистема обладает своими индивидуальными особенностями, которые в первую очередь связаны с составом и графиками нагрузки, поэтому типовых рекомендаций по выбору ГУ объектов РГ и типовых технических решений по их технологическому присоединению не существует.

Заслушав выступления и мнения экспертов по результатам дискуссии **совместное заседание секций «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» и «Электротехническое оборудование»** отмечает:

1. В настоящее время наблюдается рост числа применений электротехнических устройств с элементами силовой электроники для интеграции ГУ объектов РГ в распределительные сети, особенно в отношении ВЭС, СЭС, ГТУ, а также накопителей электроэнергии.

2. В отечественных нормативно-технических документах в настоящее время отсутствуют методические рекомендации по применению электротехнических устройств с элементами силовой электроники на объектах электроэнергетики.

3. На основании результатов имитационного моделирования с выполнением расчетов электромеханических переходных процессов, проведенных в ПК PowerFactory, подтверждена эффективность применения

электротехнических устройств с элементами силовой электроники при интеграции объектов РГ в узлы, имеющие слабые связи с энергосистемой, по сравнению с применением традиционного синхронного генератора.

4. Возможность реализации в современных системах автоматического управления (САУ) электротехнических устройств с элементами силовой электроники необходимых законов регулирования параметров режима, в соответствии с общесистемными требованиями.

5. В процессе проектирования принятие решения по интеграции ГУ объектов РГ с применением электротехнических устройств с элементами силовой электроники должно приниматься по результатам технико-экономического обоснования.

**Совместное заседание секций «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» и «Электротехническое оборудование» решило:**

1. Принять к сведению информацию по возрастающему интересу к применению электротехнических устройств с элементами силовой электроники, для интеграции ГУ объектов РГ в распределительную сеть.

2. Признать актуальными результаты проведенных исследований режимов работы электротехнических устройств с элементами силовой электроники ГУ объектов РГ при их интеграции в распределительную сеть в различных схемно-режимных условиях.

3. Рекомендовать проектным организациям при выборе того или иного способа присоединения ГУ объектов РГ к распределительным сетям проводить полный комплекс расчетов электроэнергетических режимов для разных вариантов подключения, в том числе и с использованием электротехнических устройств с элементами силовой электроники, с последующим выполнением технико-экономического сравнения анализируемых вариантов.

С заключительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», проректор по научной работе ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», к.т.н. Илюшин П.В. в котором отметил, что область применения электротехнических устройств с элементами силовой электроники для интеграции ГУ объектов РГ в распределительную сеть постоянно расширяется, что требует:

- своевременной разработки нормативно-технических документов;
- дальнейшего изучения влияния электротехнических устройств с элементами силовой электроники (инверторного оборудования) на режимы

