



**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

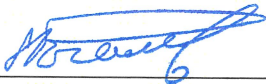


Основана в 1724 году

**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. Роголев

«21» ноября 2023 г.

ПРОТОКОЛ № 12

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

28 ноября 2023 года

г. Москва

Присутствовали: члены секции «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС»,
ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», ФГБУН «ИНЭИ РАН», АО «НТЦ ФСК ЕЭС»,
ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический
университет», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е.
Алексеева», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет им. В.Н.
Татищева», ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ООО НПП
«ЭКРА», ООО «РТСофт-СГ», всего **39** 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 развитие распределенных энергоресурсов, включая возобновляемые источники энергии, возможно только при наличии современных устройств силовой электроники, обладающих приемлемыми показателями аппаратной надежности. Все фотоэлектрические станции интегрируются в электрические сети посредством инверторных преобразователей. Ветроэнергетические установки IV типа интегрируются в электрические сети также за счет инверторных преобразователей. Управление электрическими режимами в активных распределительных сетях возможно при условии внедрения современных электротехнических устройств с элементами силовой электроники. На протяжении ряда лет в реализуемых проектах по программе ДПМ ВИЭ применялись электротехнические устройства зарубежных заводов-изготовителей. В современных условиях требуется обеспечивать потребности электроэнергетики в устройствах силовой электроники за счет их разработки и производства на отечественных заводах-изготовителях.

С докладом **«Особенности управления преобразователем напряжения по топологии ММС и его применение в системах распределения электроэнергии»** выступил Иванчин Иван Иванович, к.т.н., руководитель направления перспективных исследований Департамента высоковольтной преобразовательной техники ООО НПП «ЭКРА».

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

1. Обоснована актуальность темы доклада с точки зрения необходимости проведения теоретических и экспериментальных исследований в части создания силовых устройств, способных осуществлять непосредственное преобразование электроэнергии с целью обеспечения необходимых и заданных её параметров. Отмечено, что основные исполнительные элементы SMART Grid представляют собой устройства силовой преобразовательной техники, возможности которых тесно связаны с развитием силовой элементной базы, различных видов силовых схем и алгоритмов управления преобразователями. Также отмечено, что оптимально выбранная силовая схема инвертора напряжения уменьшает стоимость изготовления и эксплуатации преобразователя и может придать преобразователю новые свойства. Указано, что применение многоуровневых схем инверторов напряжения увеличивает количество силовых приборов, уменьшая их номинальное напряжение, что позволяет использовать более надёжные, экономичные и работающие на меньшей частоте коммутаций, а, следовательно, и с меньшими динамическими потерями, силовые ключи. Отмечается, что увеличение количества уровней напряжения в многоуровневых схемах, улучшает гармонический состав выходного напряжения и может

увеличить пульсность схемы выпрямления, что значительно снижает негативное воздействие преобразователя на сеть, а многоуровневые преобразователи с активной схемой выпрямления способны к рекуперации энергии в сеть, что приводит к повышению эффективности электропотребления. Отмечено, что на базе преобразователей создаются такие устройства как активные фильтры гармоник тока, компенсаторы реактивной мощности и объединённые контроллеры передаваемой мощности, предназначенные для улучшения работы оборудования в «слабых» сетях и снижения воздействия нелинейных потребителей электроэнергии.

2. Рассмотрены различные виды силовых схем транзисторных инверторов напряжения, проанализирована работа каждой из схем и проведено их сравнение. Отмечено, что при отсутствии жёстких требований по энергоэффективности возможно применение двухуровневых мостовых схем, управление ключами в которых глубоко проработано, имеет готовую аппаратную реализацию, в том числе и векторного формирования переменного напряжения (векторной ШИМ) в большинстве микроконтроллерах. Для снижения стоимости силовых ключей в двухуровневых инверторах на средние напряжения применяется последовательное подключение ключей более низкого класса напряжения и аппаратное выравнивание напряжения специализированными драйверами, либо устанавливается согласующий силовой трансформатор, который приводит к снижению энергоэффективности.

3. Показано, что для напряжений от 1,5-4,5 кВ (в частности, в ВЭУ) применяется трёхуровневая схема инвертора напряжения с привязкой нейтрали для ограничения уровня напряжения на управляемых ключах, так называемая схема NPC (Neutral Point Clamped). Отмечены особенности формирования цепей коммутации тока в подобных силовых преобразователях, которые обусловили применение активных схем Active-NPC. Показана возможность увеличения количества уровней формируемого напряжения увеличением количества потенциалов напряжения в звене постоянного тока, ограничивающих перенапряжения на силовых ключах через отсекающие диоды.

4. Представлена схема многоуровневого инвертора напряжения Flying Capacitor Inverter, которая позволяет уменьшить количество силовых приборов в сравнении с преобразователями по схеме NPC, так как в схеме с «плавающими» конденсаторами снимается необходимость организации привязки выходного напряжения к потенциалам звена постоянного тока. Показано, что уровни выходного напряжения зависят от цепи подключения фазных «плавающих» конденсаторов и уровня их заряда. Отмечено, что поддержка уровня заряда (балансировка напряжения) конденсаторов определяется выбором из избыточных способов формирования уровня напряжения. Указывается, что рассмотренные схемы имеют общее звено постоянного тока для всех фаз

преобразователя и это позволяет обмениваться реактивной мощностью между фазами и уменьшить емкость конденсатора в звене постоянного тока. Схемы с общим звеном постоянного тока (ЗПТ) также позволяют устанавливать общий выпрямитель для группы независимо управляемых инверторов для обмена энергией между ними через ЗПТ. Отмечается, что для уменьшения воздействия на питающую сеть и улучшения THD потребляемого тока в однонаправленных преобразователях применяются многопульсные схемы выпрямителей.

5. Рассмотрена схема с многообмоточным трансформатором и последовательным соединением однофазных инверторов (SCHB – Serial Connected H-Bridges), количество которых определяет номинальное выходное напряжения преобразователя. Отмечено, что напряжение ЗПТ однофазных инверторов формируется выпрямленным напряжением гальванически изолированных вторичных обмоток трансформатора, со смещёнными относительно друг друга фазами с целью увеличения суммарной пульсности всех выпрямителей. Это улучшает совместимость преобразователя с сетью и позволяет производить «горячее» шунтирование неисправного силового блока без дополнительного резервирования, сохранив работоспособность преобразователя, без нарушения технологии производства.

6. Рассмотрена схема модульного многоуровневого преобразователя, в которой в отличие от предыдущей схемы применяется последовательное соединение полумостов и появляется возможность формирования общего ЗПТ, величина напряжения которого определяется суммарным количеством полумостов. Отмечено, что каждое полуплеcho фазы преобразователя работает во всём диапазоне напряжения ЗПТ, что приводит к увеличению силовых приборов инверторной части преобразователя в два раза. Напряжение ЗПТ при этом может формироваться либо многопульсной схемой выпрямления, либо активным выпрямителем, аналогичным инверторной части. Указывается, что схема обладает лучшей функциональностью, простотой дальнейшего увеличения выходного напряжения добавлением силовых блоков в фазе преобразователя частоты и имеет меньшую массу по причине отсутствия многообмоточного трансформатора, что уменьшает дополнительные материальные затраты на размещение оборудования. Отмечено, что схема используется в передачах постоянного тока, построенных на преобразователях напряжения.

7. Утверждается, что для многоуровневых преобразователей, построенных по различным схемам, предполагающим различные комбинации для формирования уровня фазного напряжения (избыточные состояния) целесообразно выделить алгоритм вычисления коммутационной функции (RU 130160U1) для возможности выбора оптимального метода модуляции для определённой силовой схемы преобразователя. Указывается, что для вычисления независимой фазной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с формированием

многоуровневого напряжения в качестве модулирующего сигнала чаще всего используется двухсторонние пилообразные сигналы, которые смещены между собой по времени или по времени и уровню, количество которых определяется числом уровней напряжения.

8. Отмечено, что при независимой фазной ШИМ амплитуда синусоидального сигнала ограничивается $1/2$ напряжения ЗПТ, при этом максимально возможное напряжение в фазе нагрузки с изолированной общей точкой определяется как $\pm 2/3$ напряжения ЗПТ. Указывается, что для более эффективного использования напряжения ЗПТ с подобной нагрузкой целесообразно применять метод предмодуляции одинаковым смещением управляющего сигнала всех фаз, которое не оказывает влияния на межфазное напряжение и позволяет увеличить амплитуду синусоидального сигнала на $(2/\sqrt{3} - 1) \cdot 100\%$, в сравнении методом без предмодуляции.

9. Рассмотрен векторный способ ШИМ многоуровневым инвертором, который предполагает формирование напряжения коммутациями трёх ближайших к заданному базовых векторов результирующего напряжения многоуровневого инвертора. Базовые вектора определяются как все возможные комбинации дискретных уровней напряжения в фазах преобразователя. Отмечается, что коммутации ключей разных фаз в таком случае происходят согласовано. В результате анализа зависимости гармонических искажений формируемого напряжения от амплитуды задания на номинальной частоте сделан вывод, что наиболее оптимальным является векторный способ ШИМ, который обеспечивает наименьший THD и его наиболее равномерное изменение.

10. Показано, что в случае возникновения неисправности силового прибора для сохранения работоспособности преобразователя соответствующий силовой блок можно перевести в режим байпаса, который приводит к уменьшению количества формируемых уровней фазного напряжения. Рассмотрен способ формирования максимального возможного синусоидального линейного напряжения с перерасчетом угловых смещений синусоидальных заданий фазных напряжений. При этом на комплексной плоскости концы векторов фазных действующих значений напряжения являются вершинами равностороннего треугольника, стороны которого соответствуют действующим значениям линейного напряжения. Отмечено, что так как при векторной ШИМ задание формируется в виде вектора напряжения, то при байпасе необходимо лишь учитывать уменьшение максимальной амплитуды результирующего вектора напряжения, тогда уходит необходимость вычисления и формирования угловых сдвигов синусоидальных заданий фазного напряжения как при независимой фазной ШИМ, что значительно упрощает систему управления.

11. Рассмотрены принципы формирования выходного напряжения модульного многоуровневого преобразователя. Показана возможность

независимого управления выходным током фазы преобразователя, определяющим электромагнитную энергию, протекающую со стороны сети или нагрузки переменного тока и током ЗПТ, определяющим энергию, протекающую со стороны системы постоянного тока. Отмечено, что мгновенная мощность фазе преобразователя носит колебательный характер с частотой в два раза большей частоты выходного напряжения, что в трехфазной системе приводит к инвертированию направления вращения суммарного вектора. Предложена система управления (СУ) преобразователем, построенная на возможности независимого регулирования выходного тока и тока в ЗПТ.

12. Отмечено, что колебания мощности в фазах преобразователя приводят к изменению уровня напряжения на конденсаторах силовых блоков, что обуславливает необходимость вычисления емкости для исключения перенапряжений и выхода из строя элементов преобразователя. Предложено нужную величину ёмкости находить задаваясь средним и максимально допустимым значениями напряжений конденсатора с учётом коэффициентом запаса по напряжению конденсатора через нахождение аналитического выражения для диапазона изменения электромагнитной энергии в фазе за период заданной мощности. Полученное выражение выявило зависимость изменения энергии от коэффициента мощности на стороне переменного тока.

13. Показано, что снижение частоты выходного напряжения при подготовительных и сервисных работах на генерирующих установках до нуля с ненулевой выходной мощности преобразователя теоретически может привести к увеличению напряжения на конденсаторах в фазе модульного многоуровневого преобразователя до бесконечности. Для снижения напряжения конденсатора необходимо обеспечить обмен мгновенной электромагнитной мощностью между верхним и нижним плечом преобразователя. Для этого в фазный ток преобразователя добавляется ток и напряжение смещения повышенных частот, которые не оказывают влияния на межфазное напряжение и выходной ток преобразователя. Представлено аналитическое выражения для определения необходимого тока преобразователя. Предложена СУ преобразователем, исключающая возможность перенапряжения на конденсаторах при снижении выходной частоты преобразователя при подготовительных и сервисных работах.

14. Предложена математическая модель трёхфазного модульного многоуровневого преобразователя, в которой коммутационная функция силовых транзисторов вычислялась с учётом баланса напряжения на конденсаторах 60-ти силовых блоков преобразователя частоты номинальным напряжением 6 кВ переменного тока и 10 кВ в ЗПТ. Показана необходимость произвести контролируемый заряд множества конденсаторов силовых блоков преобразователя, имеющих значительную суммарную емкость перед переходом в рабочий режим, так как при подключении силового напряжения зарядный ток

через обратные диоды силовых блоков выпрямителя может привести к разрушению элементов преобразователя. Представлены осциллограммы процесса заряда, на которых показана возможность независимого регулирования напряжения ЗПТ и на конденсаторах как выпрямителя, так и инвертора.

15. Представлены осциллограммы, демонстрирующие работу модульного многоуровневого преобразователя в режиме регулирования электромагнитной мощности. В качестве источника энергии со стороны инвертора подключалась синхронная машина с фиксированной частотой вращения вала и регулируемым вектором тока якоря. Показано, что величина активной электромагнитной мощности со стороны выпрямителя соответствует активной мощности со стороны инвертора, с учётом потерь в выпрямителе. Передача активной мощности между выпрямителем и инвертором преобразователя происходила через ЗПТ, выполняющего роль вставки постоянного тока напряжением 10 кВ.

В обсуждении доклада и прениях выступили:

Илюшин П.В. (НП «НТС ЕЭС», ФГБУН «ИНЭИ РАН»), Зайнутдинова Л.Х. (ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева»), Бурмейстер М.В. (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»).

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 формирование низкочастотного напряжения на выходе инверторных преобразователей требуется только для частотно-регулируемых приводов, а также в устройствах, в которых применяется электромеханическое преобразование энергии. Для электротехнического оборудования, работающего в составе энергосистем и изолированных энергорайонов нижний предел по частоте составляет 45 Гц. При этом значении частоты срабатывают устройства релейной защиты, отключающие без выдержки времени все генерирующие установки.

Отметил, что в сетях внутреннего электроснабжения промышленных потребителей в эксплуатации находятся в динамические компенсаторы провалов (прерываний) напряжения. В магистральных и распределительных электрических сетях получили применения устройства компенсации реактивной мощности различных видов и типов с элементами силовой электроники, устройства продольной компенсации и передачи постоянного тока. Для их более широкого применения требуется снижение их стоимостных показателей.

Обратил внимание, что для изготовления современных электротехнических устройств с элементами силовой электроники, рассмотренных в докладе, требуется поставка зарубежных IGBT-транзисторов,

так как отечественная промышленность не в полной мере может удовлетворить существующие потребности как по количеству, так и по качеству.

Обратил внимание, что для работы фотоэлектрической станции в ночные часы инверторные преобразователи должны позволять потреблять реактивную мощность из прилегающей электрической сети для снижения уровней напряжения на шинах подстанций в режимах минимальных нагрузок. При этом в часы утреннего и вечернего максимумов нагрузки в энергосистеме они должны обеспечивать возможность выдачи реактивной мощности во внешнюю сеть для повышения уровней напряжения в узлах нагрузки.

Отметил, что устройства силовой электроники, рассмотренные в докладе, предназначены для генерирующих установок установленной мощностью в диапазоне от нескольких сотен кВт до нескольких МВт. Их применение в системах микрогенерации мощностью до 15 кВт, используемых в частных домохозяйствах, экономически нецелесообразно. Требуется создание и производство инверторных преобразователей для сектора микрогенерации.

Зайнутдинова Л.Х. – Руководитель научно-образовательного центра «Альтернативная энергетика», профессор кафедры «Электротехника, электроника и автоматика» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева», д.п.н., к.т.н., профессор.

Обратила внимание на корректность написания формул мгновенных и средних значений, используемых автором в представленной презентации к докладу.

Подчеркнула актуальность разработок, представленных в докладе, для развития генерации на основе ВИЭ в России. Требуется выход на заводы-изготовители генерирующего оборудования для ветровых и фотоэлектрических станций с целью применения инверторных преобразователей отечественных заводов-изготовителей в новых реализуемых проектах генерации на основе ВИЭ.

Бурмейстер М.В. – ассистент кафедры «Электроэнергетические системы» НИУ «МЭИ».

Отметил, что установка инверторных преобразователей с двух сторон, позволяющая осуществлять рекуперативное торможением, применяется на генерирующих установках с прямым преобразованием электроэнергии.

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. Важность и актуальность поднятой в докладе проблемы построения силовых полупроводниковых преобразователей для инверторно-подключаемых генерирующих установок распределённой генерации, накопителей электроэнергии и устройств управления режимами работы электрических сетей.

2. Целесообразность и перспективность формирования отечественных компетенций по построению различных конфигураций силовых полупроводниковых преобразователей и их систем управления для различных применений в электроэнергетике.

3. Целесообразность и перспективность использования в электроэнергетике технических решений по силовым полупроводниковым преобразователям, прошедшим практическую проверку в других отраслях и областях техники.

4. Наличие в отечественной электротехнике у отечественных заводоизготовителей опыта реализации проектов на базе силовых полупроводниковых преобразователей на напряжение выше 1 кВ.

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 автору продолжить исследования в области совершенствования систем управления силовыми полупроводниковыми преобразователями с упором на реализацию функционала, необходимого для надежной работы этих преобразователей в электрических сетях.

2. Рекомендовать Техническому комитету по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика» Росстандарта сформировать рабочую группу по стандартизации требований к силовым полупроводниковым преобразователям, работающим в различных применениях в электрических сетях.

3. Рекомендовать производителям оборудования для объектов генерации на основе ВИЭ, систем накопления электроэнергии на базе различных технологий, Системному оператору и электросетевым компаниям разработать и утвердить типовые технические требования к силовым полупроводниковым преобразователям, работающим в различных применениях в магистральных и распределительных электрических сетях.

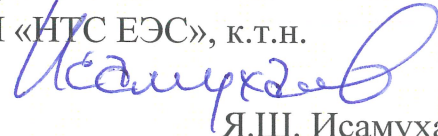
4. Рекомендовать Минэнерго России рассмотреть возможность создания на базе одного из субъектов электроэнергетики с государственным участием испытательного полигона для проведения натурных испытаний отечественных силовых полупроводниковых преобразователей с различными источниками энергии на стороне постоянного тока, а также без них.

С заключительным 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., в котором отметил, что корректное функционирование и дальнейшее развитие активных распределительных сетей невозможно без применения устройств управления режимами на базе силовых полупроводниковых преобразователей. Поэтому, особую важность приобретает анализ результатов реализации пилотных проектов по внедрению силовой преобразовательной техники на реальных объектах электроэнергетики. Это важно для последующей разработки типовых технических требований к силовым полупроводниковым преобразователям, типовых технических решений для различных применений, а также методических рекомендаций по обоснованию и применению новых видов оборудования на базе силовой электроники. Требуется обобщение опыта применения перечисленных устройств для оценки технической и экономической эффективности их внедрения. Уделение должного внимания представленной области исследования необходимо в условиях массовой интеграции в распределительные электрические сети объектов распределенной генерации и микрогенерации, в том числе на основе ВИЭ, управление режимами которых без внедрения силовой преобразовательной техники становится невозможным.

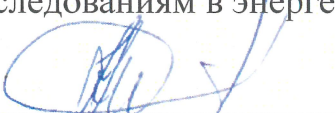
Первый заместитель Председателя
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор

 В.В. Молодюк

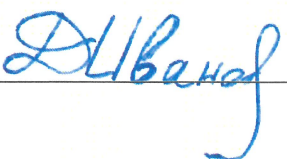
Ученый секретарь
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.

 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»

 Д.А. Ивановский