

УДК 621.311

**Коновалов Юрий Васильевич,**

к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: yrvaskon@mail.ru

**Терехова Анна Андреевна,**

обучающаяся группы ЭЭ-22-1,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: annaandreevnaterehova@mail.ru

**Шитенков Григорий Александрович,**

обучающийся группы ЭЭ-22-1,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail:  
egoryshitenkov@yandex.ru

**Головатюков Леонид Константинович,**

обучающийся группы ЭЭ-22-1,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail:  
leonid.golovatiukov@mail.ru

**Малинин Николай Константинович,**

обучающийся группы ЭЭ-22-1,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail:  
nikolaymalinin@gmail.com

**Кузнецов Максим Евгеньевич,**

обучающийся группы ЭЭ-22-1,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

*Konovalev Yu.V., Terehova A.A., Shitenkov G.A., Golovatyukov L.K., Malinin N.K.,  
Kuznetsov M.E.*

## INCREASING THE EFFICIENCY OF ELECTRICITY TRANSMISSION

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы повышения эффективности передачи электроэнергии путем создания мощных сверхдальних линий электропередачи ультравысокого напряжения, выделены объективные предпосылки перспективности их применения, а также тенденции к использованию техники постоянного тока для связи между энергосистемами. Определены первоочередные направления для подготовки и реализации программы развития передач постоянного тока и вставок постоянного тока в единой энергетической системе России.

**Ключевые слова:** эффективность, передача электроэнергии, ультравысокое напряжение, техника постоянного тока, связи между энергосистемами.

**Abstract.** The issues of increasing the efficiency of electricity transmission by creating powerful ultra-high voltage long-distance power lines are considered, objective prerequisites for the prospects of their use are highlighted, as well as trends towards the use of direct current technology for communication between energy systems. Priority directions have been identified for the preparation and implementation of the program for the development of direct current transmissions and direct current inserts in the unified energy system of Russia.

**Keywords:** efficiency, power transmission, ultra-high voltage, direct current technology, connections between power systems.

Проведенные в конце XX века разработки показали принципиальную возможность создания мощных сверхдальних линий электропередачи ультравысокого напряжения (УВН) с целью передачи большого количества электроэнергии, повышения маневренности и надежности крупных государственных энергетических систем [1]. Более

широкое практическое воплощение в жизнь технология передачи электроэнергии с использованием воздушных линий (ВЛ) УВН получила в 21 веке в Китае. Так, начиная с 2009 года в Китае введены в эксплуатацию несколько ВЛ переменного тока напряжением 1000 кВ и постоянного тока напряжением  $\pm 800$  кВ. Исследования в области ВЛ УВН

ведутся во всех странах БРИКС (Бразилия, Россия, Индия, Китай, ЮАР). На рассматриваемую перспективу передачи электроэнергии наиболее высоким классом напряжения в единой энергетической системе (ЕЭС) России остается 1000 кВ для сетей переменного тока, а также освоенные и сооружаемые ВЛ постоянного тока классов напряжения  $\pm 500$ ,  $\pm 600$  и  $\pm 800$  и  $\pm 1000$  кВ. Сравнительные характеристики ВЛ постоянного и переменного тока хорошо известны и нашли отражение в большом количестве источников как в России, так и за рубежом, в том числе в рамках СИГРЭ (CIGRE – Международный Совет по большим электрическим системам высокого напряжения) [2]. В целом можно отметить, что для транспорта электроэнергии на большие расстояния (более 1000 км), что характерно для стран БРИКС, однозначное преимущество имеют передачи постоянного тока. Такие передачи дешевле примерно на 30 %, и на 30% у них меньше потери по сравнению с передачей такого же количества электроэнергии по ВЛ переменного тока. Также перспективным является рассмотрение различных аспектов в технологии передачи и распределения электроэнергии на постоянном токе, которые в ближайшей и среднесрочной перспективе могут быть востребованы при создании передач постоянного тока при более низких напряжениях и коротких расстояниях по сравнению с дальними передачами УВН.

Актуальность развития технологий постоянного тока высокого напряжения для отечественной электроэнергетики обусловлена как внутренними объективными условиями ее функционирования, особенностями ЕЭС России как крупнейшей энергетической системы, а также особенностями работы технологически изолированных энергетических систем России, так и внешними условиями, связанными с условиями функционирования сопредельных с Россией энергосистем зарубежных стран и государственных объединений.

Учитывая перечисленные характеристики объектов постоянного тока, перспективность их применения в ЕЭС России определяется такими объективными предпосылками, как:

- 1) большая протяженность территории страны;
- 2) удаленность объектов генерации и потребителей;

3) наличие крупных региональных объединений (ОЭС), связанных между собой сравнительно слабыми связями;

4) проблема ограничения токов короткого замыкания в мегаполисах;

5) проблема энергоснабжения нефтяных оффшорных платформ и территорий с доступом через водные преграды;

6) проблема подключения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности, ветроэнергетических установок, к ЕЭС и к локальным энергосистемам.

7) значительный износ и старение существующего сетевого оборудования, условия эксплуатации которого не соответствуют современным нормам правил устройства электроустановок;

8) проблема модернизация и развития ЕЭС с последовательным присоединением к ней объединенной энергосистемы Востока и ряда изолированных энергосистем;

9) большие потери при передаче электроэнергии в распределительных сетях.

Предпосылками к использованию техники постоянного тока для связи ЕЭС России с энергосистемами других государств являются:

– наличие избыточных энергоресурсов, обеспечивающих возможность создания значительного экспортного потенциала в электроэнергетической отрасли;

– значительные сложности объединения на переменном токе с крупными зарубежными энергосистемами из-за различий в системах регулирования частоты и мощности, других систем автоматики, различий в системах оперативного управления, нормативной базы, рабочего языка и т.д.;

– большие расстояния, затрудняющие создание синхронных связей с энергосистемами стран, расположенных к югу от границ с Россией (энергообъединение Средне-Азиатских республик бывшего СССР, энергосистемы Китая, Кореи, Ирана, и др.);

– наличие водных преград (Япония);

– необходимость считаться с возможностью объединения пока небольших энергосистем азиатского региона в крупные энергопулы, что приведет к переходу связей между ними и ЕЭС России в категорию «слабых» и практически неработоспособных при использовании переменного тока, особенно в случае образования кольцевых структур;

– разные стандарты частоты (Северная Америка, Япония);

– сложности экономических взаиморасчетов при вовлечении в обменные потоки мощности большого количества энергосистем других государств (связи с энергообъединениями Западной Европы через сети бывших республик СССР и Восточноевропейских государств, связи со странами Средней и Центральной Азии через сети энергосистем Закавказских и Средне-Азиатских республик бывшего СССР и т.д.).

В качестве возможных первоочередных направлений для подготовки и реализации программы развития передач постоянного тока (ППТ) и вставок постоянного тока (ВПТ) в ЕЭС России, можно рассматривать следующие.

1. Разработка общих технических решений по многоузловым вставкам постоянного тока для повышения качества управления режимами и снижения токов короткого замыкания в сетях мегаполисов.

В настоящее время традиционным способом по поддержанию уровней токов короткого замыкания в допустимых пределах является секционирование сети, которое снижает надежность работы сети и ее управляемость. Применение ВПТ не только ограничивает подпитку токов короткого замыкания аварийного узла, но и дает возможность управлять перетоками мощности в энергосистеме.

Применение ВПТ в электросетях мегаполисов более эффективно ограничивает токи короткого замыкания, повышает надежность, управляемость и связность сети. Экономический эффект работы состоит в снятии ограничений на развитие сетей мегаполиса, связанных с ограничением токов короткого замыкания, снижение затрат на замену выключателей, снижение числа разрывов в сети мегаполиса, в повышении управляемости сети.

2. Разработка и обоснование принципиальных технических решений по объектам постоянного тока для энергоснабжения изолированных энергосетям и районов Дальнего Восток.

В качестве одной из отраслевых задач в Энергетической стратегии России на период до 2035 года [3] предусмотрена модернизация и развитие ЕЭС с последовательным присоединением к ней объединенной энергосистемы Востока и ряда изолированных энергосистем (с учетом возможных технико-экономических последствий) при обеспече-

нии эффективной надежности электроснабжения в сочетании с интеллектуализацией систем.

3. Разработка и обоснование принципиальных технических решений по объектам постоянного тока для энергоснабжения островных и полуостровных территорий, автономных нагрузок и оффшорных платформ.

В настоящее время обостряется проблема обеспечения надежного электроснабжения островных территорий, а также территорий, удаленных от центральных электрических сетей, не имеющих централизованного энергоснабжения. Дефицит электрической мощности тормозит развитие инфраструктуры этих районов. Традиционно энергоснабжение таких территорий осуществляется при помощи дизельных электроустановок. Недостатками таких установок являются низкий коэффициент полезного действия, высокая стоимость электроэнергии, существенная экологическая нагрузка на окружающую среду.

Обеспечение снабжения электроэнергией удаленных и островных территорий от единой электрической сети при помощи кабельной передачи постоянного тока позволит сократить суммарное потребление топлива на выработку электроэнергии (даже с учетом потерь в кабельной передаче), приведет к уменьшению выброса  $\text{CO}_2$  в атмосферу, повысит надежность и понизит стоимость электроснабжения потребителей. Применение передач на преобразователях напряжения позволит решить проблему энергоснабжения автономного потребителя.

В связи с тем, что в настоящее время рассматриваются различные варианты повышения надежности электроснабжения удаленных районов Крайнего Севера и островных территорий, необходимо при принятии решений использовать преимущества энергоснабжения при помощи передач постоянного тока.

4. Разработка и обоснование принципиальных технических решений по объектам постоянного тока для присоединения ВИЭ к ЕЭС и к локальным энергосистемам.

Энергетической стратегии России на период до 2035 года отмечается, что для сохранения конкурентоспособности российского ТЭК потребуется ускоренное освоение совокупности перспективных групп технологий, таких как ВИЭ, водородная энергетика, накопители энергии и интеллектуальные се-

ти.

Также отмечается, что перспективной областью применения ВИЭ в России являются изолированные и удаленные энергорайоны, а также резервирование системы электроснабжения особо ответственных потребителей (повышенной категории надежности).

С учетом изложенного задачами развития ВИЭ являются:

- ввод новых генерирующих мощностей, функционирующих на основе ВИЭ, при условии их экономической эффективности;

- развитие отечественной научно-технической базы и освоение передовых технологий в области использования ВИЭ, наращивание производства на территории Российской Федерации основного генерирующего и вспомогательного оборудования для ВИЭ.

Одним из способов подключения ВИЭ к ЕЭС и к локальным энергосистемам является использование преобразовательной техники, передач постоянного тока. Работа является актуальной для реализации положений энергетической стратегии России.

5. Разработка и исследование объектов постоянного тока на основе модульных многоуровневых преобразователей напряжения.

Преобразователи напряжения (ПН) постоянного тока характеризуются независимым управлением активной и реактивной мощностью, способностью выдавать реактивную мощность, поддерживать постоянство напряжения на стороне переменного тока, возможностью энергоснабжения слабых энергосистем и пассивных нагрузок, уменьшенным размером фильтров высших гармоник на стороне переменного тока. Эти свойства позволяют использовать их для решения широкого спектра задач электроэнергетики. На сегодняшний день за рубежом проводятся исследования в области многоподстанционных передач на преобразователях напряжения, разработки методических основ и стандартов для проектирования сетей постоянного тока на основе преобразователей напряжения.

Компанией Siemens была предложена модульная многоуровневая структура для преобразователя напряжения, которая является перспективным направлением развития преобразователей напряжения. Модульные многоуровневые преобразователи напряжения (ММПН) находят все более широкое применение в электроэнергетике благодаря

следующим преимуществам:

- модульность, заключающаяся в возможности использования недорогих стандартных низковольтных электронных компонентов, обеспечивающая максимальную экономическую эффективность;

- высокая надежность;

- низкий уровень гармонических искажений выходного напряжения благодаря высокой эквивалентной частоте модуляции (в некоторых случаях даже не требуется фильтров на стороне переменного тока);

- низкие потери (по некоторым данным КПД преобразователя оценивается на уровне 98,98%).

Благодаря перечисленным свойствам, являясь регулируемым элементом электропередач, ММПН повышают их управляемость, энергоэффективность, надежность электроснабжения потребителей. Среди возможных сфер применения ММПН: ветроэлектрические установки, кабельные ППТ, многоподстанционные ППТ, сети постоянного тока, где ММПН может заменить традиционный трехуровневый преобразователь напряжения по технологии HVDC Light.

6. Разработка и обоснование принципиальных технических решений по объектам постоянного тока для экспортных электропередач.

В качестве одной из отраслевых задач в Энергетической стратегии России на период до 2035 года предусмотрена интеграция электроэнергетики в Едином экономическом пространстве Евразийского экономического союза (ЕАЭС) и увеличение экспорта электрической энергии и мощности, прежде всего на востоке страны.

Российская Федерация активно реализует планы по расширению экспортных поставок электроэнергии за рубеж, в том числе в Западную Европу, Китай, Корею, Японию и другие страны.

Так, например, в 2012 г. Россия заключила долгосрочный контракт на поставку 100 млрд кВт·ч электроэнергии в КНР до 2036 года. Базой поставок являются как существующие электростанции Сибири и Дальнего Востока, так и планируемые к реализации проекты строительства новой генерации. В рамках реализации проекта «Строительство 4-й очереди Сахалинской ГРЭС-2» обсуждаются вопросы экспорта электроэнергии в Японию. Разрабатывается проект «Печенгский энергомомент», предусматривающий экс-

порт электроэнергии в Норвегию в объеме 200 МВт.

В Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2035 года [4] основное наращивание экспорта электроэнергии намечено в китайском направлении с использованием экспортных электропередач от Олонь-Шибирской ТЭС, Харанорской ТЭС-2 и Ерковецкой ТЭС. В силу обстоятельств, указанных выше, применение техники постоянного тока предпочтительно для связи ЭЭС России с энергосистемами других государств с целью реализации экспорта и импорта электроэнергии.

7. Разработка и обоснование принципиальных технических решений по объектам постоянного тока для электропередач ультравысокого напряжения.

В Энергетической стратегии России на период до 2035 новые технические средства для эффективной передачи электроэнергии на дальние расстояния, включая перспективное электротехническое оборудование для ЛЭП переменного и постоянного тока на ультравысокие параметры отнесены к приоритетным технологиям и материалам.

В соответствии с Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики на период до 2035 года в 2025 году планируется сооружение ППТ  $\pm 750$  кВ пропускной способностью 3000 МВт, протяженностью 1850 км для увеличения пропускной способности межсистемных сечений по направлению Урал-Средняя Волга-Центр и обеспечения режимных перетоков мощности. В период 2021-2030 гг. намечается сооружение ППТ  $\pm 500$  кВ Сибирь-Тюмень пропускной способностью 2000 МВт и протяженностью 900 км.

Также в Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики на период до 2035 года в разделе «Основные проблемы функционирования и развития электроэнер-

гетики» отмечается такая проблема как незавершенность формирования ЭЭС России. Отсутствие широтной передачи «Сибирь-Урал-Центр» с достаточной пропускной способностью не позволяет в полном объеме реализовывать межсистемные эффекты, в том числе привлекать свободную мощность сибирских ГЭС к регулированию графика нагрузки в Европе.

К основным задачам при разработке и обосновании принципиальных технических решений по объектам постоянного тока для электропередач УВН следует отнести внедрение следующих технологий и оборудования, в частности, в электрических сетях:

- системообразующие сети постоянного тока и оснащенные устройствами векторного регулирования сети переменного тока;

- электрический транзит ультравысокого напряжения 1500 кВ ( $\pm 750$  кВ) постоянного тока «Сибирь-Урал-Европейская часть России».

В Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2035 года основное наращивание экспорта электроэнергии намечено в китайском направлении с использованием экспортных электропередач от Олонь-Шибирской ТЭС, Харанорской ТЭС-2 и Ерковецкой ТЭС. Все эти передачи предполагается выполнить на постоянном токе с использованием напряжения  $\pm 800$  кВ.

В мировой электроэнергетике отмечается все более широкое применение технологии постоянного тока для повышения эффективности передачи больших электрических мощностей на дальние расстояния и для обеспечения связи между энергосистемами. Это обосновывается рядом их технико-экономических, технологических, экологических преимуществ по сравнению с линиями переменного тока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение эффективности систем передачи электрической энергии с помощью вставок постоянного тока высокого напряжения. Интернет-портал Energo-Consultant.ru. [Электронный ресурс] URL: [https://www.energo-konsultant.ru/sovets/elektrosnabgenie/yuridicheskim\\_licam/kak\\_sekonomit/Kak\\_predpriyatiu\\_s\\_elektrostanicie\\_snizit\\_zatra-ti\\_na\\_elektoenergiu/](https://www.energo-konsultant.ru/sovets/elektrosnabgenie/yuridicheskim_licam/kak_sekonomit/Kak_predpriyatiu_s_elektrostanicie_snizit_zatra-ti_na_elektoenergiu/) (обращение 02.11.2023).

2. Добро пожаловать в CIGRE [Электрон-

ный ресурс] URL: [http:// https://www.cigre.org/](http://https://www.cigre.org/) (обращение 30.10.2023).

3. Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9.06.2020 года № 1523-р. [Электронный ресурс] URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRB7wx.pdf> (обращение 30.10.2023).