

Исследования системных аспектов применения передач и вставок постоянного тока

Приведен краткий обзор работ, посвященных изучению системных аспектов применения передач и вставок постоянного тока, выполнявшихся в лаборатории (отделе) электрических систем от момента ее создания до настоящего времени.

Ключевые слова: передачи и вставки постоянного тока, энергосистемы, физическое и математическое моделирование, регулировочные характеристики ППТ, статическая устойчивость, области применения, влияние ППТ на надежность, многоподстанционные передачи, вставки на преобразователях напряжения, перспективы применения.

Данный материал был подготовлен в связи с 70-летним юбилеем НИИПТ по поручению редколлегии журнала.

Основными направлениями работ лаборатории (отдела) электрических систем (ЛЭС) являются исследования установившихся и переходных электромеханических режимов, устойчивости и надежности, систем регулирования и противоаварийной автоматики больших энергосистем. Появление в этих энергосистемах объектов постоянного тока потребовало проведения соответствующих исследований, а также разработки необходимого инструментария для их выполнения. Работы проводились по следующим направлениям:

- Разработка физических и математических моделей передач постоянного тока.
- Изучение регулировочных характеристик передач постоянного тока и возможностей их использования в системах противоаварийной автоматики.
- Исследование статической (апериодической и колебательной) устойчивости энергосистемы с передачами постоянного тока.
- Определение областей рационального применения ППТ.
- Влияние ППТ на надежность работы энергосистем.
- Многоподстанционные электропередачи постоянного тока.
- Вставки постоянного тока на преобразователях напряжения.
- Разработка перспектив применения передач постоянного тока в ЕЭС и для связи с энергосистемами других государств.

Рассмотрим вкратце некоторые результаты выполненных работ по указанным направлениям.

Разработка физических и математических моделей передач постоянного тока

Базой для проведения большинства исследований, выполнявшихся в ЛЭС, являлись модели энергосистем. В первые годы существования лаборатории это были исключительно физические модели, затем, в условиях появления цифровой техники, к ним добавились и математические модели.

В связи с необходимостью изучения проблематики постоянного тока уже первая электродинамическая модель лаборатории включала в себя шесть преобразовательных

блоков, выполненных на основе использования тиристорных и оснащенных системами управления и регулирования по образцу первой передачи постоянного тока Кашира – Москва. Так, регулирование углов погасания инверторов в этой модели осуществлялось не с помощью принятых в настоящее время регуляторов углов погасания (РУП), а с помощью компаундирующего устройства, отображающего зависимость величины этих углов от уровня выпрямленного тока и напряжения на стороне переменного тока [1].

В последующем модели преобразователей ППТ были заменены другими, выполненными на основе полупроводниковой техники, было усовершенствовано их регулирование и увеличено количество самих мостов, что позволило проводить исследования работы уже многоподстанционных передач постоянного тока.

В начале 2000-х годов в составе электродинамической модели появились и преобразовательные мосты на полностью управляемых вентилях, что позволило провести исследования особенностей работы вставки постоянного тока на преобразователях напряжения.

Наряду с созданием физических моделей разрабатывались методы учета передач и вставок постоянного тока на цифровых моделях. Большинство работ этого направления предназначались для использования в программах расчета установившихся и переходных электромеханических режимов с использованием однолинейных схем замещения. Один из таких алгоритмов по учету вставок и многоподстанционных электропередач постоянного тока был реализован в 1988 г. в составе широко использовавшейся в стране программы «Мустанг» [2, 3]. Разработан в 2010 г. и алгоритм учета вставки на преобразователях напряжения [4], который в настоящее время наряду с алгоритмом учета вставки на преобразователях тока принят к использованию в программном комплексе «Рустаб».

Несколько в стороне от основной тематики ЛЭС, включающей исследования установившихся и переходных электромеханических процессов, стоят работы Д. П. Дижурова 60–70-х годов по разработке математических моделей преобразователей и передач постоянного тока для исследования электромагнитных переходных процессов [5–8]. Им был предложен метод моделирования на ЦВМ переходных процессов в вентильных преобразовательных схемах, использующий возможность представления в ЦВМ широкого диапазона чисел и высокую точность выполнения арифметических операций. Путем замещения вентилей индуктивно-активными элементами с параметрами, резко отличающимися от параметров остальных элементов схемы, уравнения преобразователя были сведены к системе дифференциальных уравнений с постоянной структурой и переменными коэффициентами, справедливой для всех структурных состояний схемы и произвольной формы поданных на нее напряжений. Были разработаны способы упрощения системы уравнений преобразователя, позволяющие получить простые схемы его замещения на постоянном и переменном токе. Экспериментально определены погрешности моделирования при использовании различных численных методов. Была разработана программа для ЦВМ М-220 расчета установившихся и переходных режимов передачи постоянного тока методом численного моделирования, свободным от обычно принимаемых допущений.

Регулировочные характеристики передач постоянного тока и возможности их использования в системах противоаварийной автоматики

Исследования эффективности управления мощностью ППТ по параметрам смежной линии переменного тока с целью повышения устойчивости работы последней явились едва ли не первыми в ЛЭС в части обсуждаемой тематики. В этих иссле-

дованиях, выполнявшихся в середине 50-х годов под руководством Г. И. Поляка применительно к схеме примыкания ППТ Волгоград – Донбасс, рассматривалось управление мощностью этой передачи с целью повышения устойчивости ВЛ 500 кВ переменного тока Волгоград – Москва [9]. Было показано, в частности, что введение регулирования мощности ППТ по параметрам линии переменного тока позволяет обеспечить устойчивость установившихся режимов с углами по линии больше 110° . Практического значения такие режимы не имели, однако их достижение свидетельствовало об эффективности управления мощностью ППТ.

Это направление было впоследствии развито применительно к проектировавшейся ППТ Экибастуз – Центр. При изучении эффективности использования этой ППТ в системе противоаварийной автоматики была выявлена существенная зависимость ее перегрузочной способности от параметров примыкания ее подстанций к энергосистеме и от состава подстанционных устройств компенсации реактивной мощности [10]. При этом было показано, что команда от ПА на реализацию завышенного уровня загрузки ППТ вызовет снижение напряжения на стороне переменного тока и она не будет отработана, что может привести к развитию аварии. Полученные результаты выявили необходимость включения в систему противоаварийной автоматики специального блока выявления перегрузочной (форсировочной) способности в текущем режиме и послеаварийных схемно-режимных условиях.

Эти работы продолжались и позже [11]. В начале 90-х годов были рассмотрены вопросы оценки форсировочной способности ППТ, работающей в сложной энергосистеме. Проанализирован характер отработки команды ПА (противоаварийной автоматики) на изменение мощности ППТ, рекомендован ввод дополнительного воздействия на изменение уставки АРВ синхронных компенсаторов, устанавливаемых на шинах преобразовательных подстанций. Обращено внимание на необходимость совершенствования техники быстрой форсировки передачи постоянного тока, оснащенной двухканальным регулятором мощности. Были рассмотрены методические вопросы оценки регулировочных возможностей сети постоянного тока для использования ее в системе противоаварийной автоматики [12–16].

Исследования статической (апериодической и колебательной) устойчивости энергосистемы с передачами постоянного тока

Одним из важнейших вопросов при включении передач постоянного тока в энергосистемы соизмеримой мощности является вопрос обеспечения их статической устойчивости. В этом направлении в 70-х годах в лаборатории был выполнен большой объем работ [17–21]. Были рассмотрены проблемы как апериодической, так и колебательной устойчивости передач с различными системами регулирования. Анализ апериодической устойчивости был доведен до уровня аналитических выражений, в которых примыкающие энергосистемы представлены в виде эдс за эквивалентными проводимостями. Показано, что условия апериодической устойчивости ППТ ухудшаются по мере удаления инверторной подстанции от генерирующих центров. Был выполнен анализ апериодической устойчивости ППТ, регулируемой на постоянство активной мощности. На примере ППТ Экибастуз – Центр было показано, что пределы апериодической устойчивости ППТ в случае регулирования мощности значительно ниже, чем при регулировании выпрямителя на постоянство тока.

Практическим выводом из анализа аperiodической устойчивости явилось требование к уровню жесткости примыкания инверторной подстанции, который должен характеризоваться величиной отношения короткого замыкания, представляющего собой отношение мощности короткого замыкания в точке примыкания подстанции к номинальной мощности ППТ, не ниже двух.

Методика проведения исследований колебательной устойчивости схем, содержащих передачи постоянного тока, зависит от сравнительной мощности ППТ и примыкающих энергосистем. При проведении исследований режимов и устойчивости ППТ в 30–50-х годах предполагалось, что напряжение на шинах переменного тока выпрямительной и инверторной подстанций постоянно и не зависит от режима ППТ.

Однако уже при анализе работы ППТ Волгоград – Донбасс оказалось необходимым учесть реакцию энергосистемы на переходные процессы в ППТ. Исследования, выполнявшиеся на электродинамической модели энергосистем, помимо определения границ областей устойчивости позволили изучить характер развития того или иного вида неустойчивости. В этих исследованиях было показано, что воздушные передачи постоянного тока средней протяженности, характеризующиеся весьма высокими собственными частотами колебаний, не в состоянии вызвать самораскачивание синхронных машин, в связи с чем при анализе устойчивости последних ППТ может быть представлена своими статическими характеристиками.

Для сверхмощных передач характерны большая протяженность линий, малое отношение мощности короткого замыкания, а также использование в качестве источников реактивной мощности, помимо конденсаторных батарей, синхронных компенсаторов. Все эти особенности способствуют взаимозависимости переходных процессов на стороне постоянного и переменного тока. Наиболее удобным для проведения работы был признан метод Д-разбиения, учет ППТ при использовании которого проводился по специально разработанной методике. Основу методики составляет отказ от учета импульсности преобразователей и системы регулирования ППТ. Вместе с тем по «гладкой» составляющей учитываются переходные процессы во всех элементах передачи постоянного тока. Уравнения элементов энергосистемы и их связь с ППТ записываются в $q - d$ -осях. Определяется необходимое количество Т-ячеек в схеме замещения линии постоянного тока с точки зрения воспроизведения ее частотных характеристик. Проведена экспериментальная проверка предложенной методики.

Было показано, что при удаленном примыкании преобразователей устойчивость ППТ в зоне малых коэффициентов усиления РТ может лимитироваться как колебательной, так и аperiodической неустойчивостью.

Определение областей рационального применения ППТ

Как известно, основными областями применения объектов постоянного тока в мировой практике являются:

- создание несинхронно работающих энергообъединений;
- кабельные линии электропередачи, преимущественно для пересечения водных препятствий;
- дальние линии электропередачи.

В последние годы к этим областям добавилась выдача мощности от офшорных ветроэлектростанций.

Для условий СССР и России на протяжении длительного периода времени наиболее актуальной областью применения ППТ являлась передача электроэнергии на дальние расстояния. Области рационального применения таких передач определялись сопоставлением затрат на их создание с затратами на сооружение линий электропередачи переменного тока той же протяженности и пропускной способности [22–24].

Проведенные исследования позволили определить так называемую критическую длину, при которой затраты на сооружение электропередач постоянного и переменного тока оказывались равными. Поскольку, как известно, у передач постоянного тока стоимость подстанций выше, а линейной части – ниже, чем у линий переменного тока, при расстояниях меньше критической длины предпочтение отдавалось линиям переменного тока, при больших расстояниях – линиям постоянного тока. Величина критической длины для линий электропередачи высших классов напряжения применительно к отечественным стоимостным показателям находилась на уровне 1000–1500 км. При этом передачи Экибастуз – Центр протяженностью 2500 км и Сибирь – Центр протяженностью 3500 км безусловно относились к области применения постоянного тока. Заметим, что в зарубежных материалах указывалось значение критической длины на уровне 700–1000 км, что, видимо, определялось иными, нежели в СССР, соотношениями стоимости высоковольтного оборудования преобразовательных подстанций и линий электропередачи.

Развитие атомной и газовой генерации, позволяющей сооружать электростанции поблизости от потребителей, несколько расширило подход к выбору оптимального способа энергоснабжения потребителей. Теперь уже речь шла о сопоставлении не только затрат на линии электропередачи, но и сопоставлении стоимости доставленной по этим линиям электроэнергии со стоимостью электроэнергии, полученной от местной генерации. При этом при сверхдлинных передачах даже постоянного тока вполне могло оказаться, что одни лишь затраты на транспорт $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ электроэнергии, без учета стоимости электроэнергии на отправном конце, уже превышали стоимость $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ от местной электростанции. Такому положению дел в значительной степени способствовало то обстоятельство, что в последние годы затраты на сооружение линий электропередачи росли в большей степени, нежели на сооружение электростанций. В результате помимо первой критической длины, разделяющей эффективность применения электропередач переменного и постоянного тока, появилась вторая критическая длина, превышение которой указывало на неэффективность дальнего транспорта электроэнергии как переменным, так и постоянным током. Заметим, что это в значительной степени российская проблема. В Китае, например, где практически отсутствует атомная и газовая генерация, а стоимость сооружения линий электропередачи существенно ниже российской, обоснование сооружения ППТ дальностью 3000 км не вызывает возражений.

Влияние ППТ на надежность работы энергосистем

В связи с созданием и развитием мощных объединений энергосистем все большее внимание обращалось на вопросы управляемости и надежности параллельной работы ОЭС, входящих в энергообъединение [25]. При этом отмечалось, что существенное значение может иметь структура системообразующей сети и, в частности, электропередач и вставок постоянного тока. При наличии таких элементов передаваемая мощность может быть автономно изменена наиболее целесообразным в зависимости

от ситуации образом, в том числе и в целях повышения устойчивости и надежности энергообъединения в случае возникновения различных аварийных повреждений.

По расположению и роли в энергообъединении передач и вставок постоянного тока в конце 80-х годов были рассмотрены два основных варианта [26, 27]:

- независимая (по частоте) работа частей энергообъединения, связываемых автономно управляемыми межсистемными связями;
- параллельная работа этих автономно управляемых связей со связями переменного тока.

Выполненные исследования и сопоставления схем энергообъединения по условиям надежности параллельной его работы при различных аварийных возмущениях позволили сделать следующие основные выводы:

1. Специальное управление мощностью ППТ в переходных режимах для повышения устойчивости энергообъединения дает значительное сокращение объема отключений потребителей противоаварийной автоматикой. При этом мощность отключаемой нагрузки оказывается даже меньше, чем в схеме без ППТ, хотя введение в состав энергообъединения мощной, протяженной и интенсивно используемой электропередачи естественно вносит значительное число аварийных возмущений, опасных с точки зрения параллельной работы.
2. Создание автономно управляемой межсистемной связи, позволяющей осуществлять независимую по частоте работу связываемых частей энергообъединения, повышает надежность работы объединения, уменьшает мощность отключаемой противоаварийной автоматикой нагрузки, способствует уменьшению числа тяжелых каскадных нарушений устойчивости межсистемных связей и тем самым повышает живучесть сложного энергообъединения. Особенно эффективно для повышения устойчивости энергообъединения использовать специальное управление мощностью этой связи во время переходных процессов.

Многоподстанционные электропередачи постоянного тока

Развитием протяженных двухподстанционных передач постоянного тока является их преобразование в многоподстанционные передачи, осуществляемое, например, подключением промежуточных подстанций. Так, при подключении к ППТ Сибирь – Центр промежуточных подстанций в районе ОЭС Урала и ОЭС С. Волги создается энергомост на постоянном токе между основными транзитными ОЭС по направлению Восток – Запад.

Для изучения особенностей работы такой системы на электродинамической модели в конце 80-х годов была собрана схема четырехподстанционной передачи постоянного тока напряжением ± 750 кВ [28, 29]. Преобразователи были оснащены системой автоматического регулирования, включающей в себя подсистемы режимного и быстроедействующего регулирования.

Подсистема быстроедействующего регулирования, предназначенная для поддержания на заданном уровне токов полюсов подстанций и углов погасания вентилей инверторных мостов, включала в себя по аналогии с регулированием двухподстанционной передачи регуляторы тока на каждом из мостов и регуляторы угла погасания на мостах, работающих в инверторном режиме.

Подсистема режимного регулирования была представлена центральным регулятором мощности, осуществляющим формирование уставок тока полюсов подстанций.

Центральный регулятор мощности на основании задания уставок мощности подстанций вычисляет уставки по току для каждого полюса каждой подстанции. При этом уставка одной из особых подстанций, называемой балансирующей, определяется как алгебраическая сумма уставок тока остальных подстанций. Другой особой подстанцией являлась подстанция, на которую была возложена функция поддержания на заданном уровне значения напряжения на линии.

Исследование переходных процессов в рассмотренной простейшей сети постоянного тока, выполненное на электродинамической модели, показало принципиальную возможность автономного управления нагрузками преобразовательных подстанций, восстановления нормальной работы преобразователей после прекращения нарушений, возникающих в системе переменного тока и в цепи постоянного тока, а также возможность использования форсировочной способности оборудования для поддержания исходного значения мощности подстанций при аварийных отключениях части оборудования сети постоянного тока.

Было установлено, что характер протекания переходных процессов в сети постоянного тока в значительной мере совпадает с характером протекания аналогичных процессов в обычной двухконцевой электропередаче постоянного тока. Выявленные особенности поведения сети постоянного тока связаны главным образом с проблемой обеспечения устойчивости распределения тока между инверторными подстанциями, особенно при наличии в составе сети подстанций с резко различными значениями номинальной мощности. Было показано, что устойчивое распределение тока между инверторными подстанциями может быть достигнуто даже в случае присоединения этих подстанций к относительно маломощным системам переменного тока.

Помимо этого, для ведения режима многоподстанционных передач постоянного тока был разработан алгоритм работы информационной подсистемы АСУ, предназначенной для оценки допустимости предлагаемого диспетчером режима загрузки преобразовательных подстанций [30]. В случае выявления недопустимости предложенного алгоритма вырабатывались рекомендации о дополнительных мероприятиях, обеспечивающих его реализацию, с информированием диспетчера о параметрах ближайшего с точки зрения заданных критериев допустимого режима. Был также в 1994 г. разработан алгоритм учета многоподстанционной передачи постоянного тока (МППТ) в системе централизованной противоаварийной автоматики [31].

Вставки постоянного тока на преобразователях напряжения

К настоящему времени помимо передач и вставок постоянного тока на преобразователях тока, о которых шла речь выше, все более широкое применение находят вставки и передачи постоянного тока на преобразователях напряжения. Это объекты, способные в нормальных режимах:

- к практически безынерционному управлению перетоком активной мощности, в том числе с возможностью осуществления реверса;
- в отличие от обычных ВПТ и ППТ, к управлению реактивной мощностью, в том числе с возможностью ее генерации;
- к работе в условиях малых отношений короткого замыкания (ОКЗ) и даже на автономную нагрузку;
- к работе без фильтровых установок.

В связи с изучением перспектив установки на ПС Могоча вставки такого типа на электродинамической модели ЛЭС было выполнено исследование особенностей работы этого объекта. С этой целью в 2003 г. была создана физическая модель вставки, оснащенная необходимой системой регулирования, с использованием которой были рассмотрены особенности нормальных и переходных режимов работы ВПТ, выполненной на основе преобразователей напряжения. Была подтверждена способность ВПТ такого типа к практически безынерционному управлению перетоком активной мощности, в том числе и с возможностью осуществления реверса, а также к управлению реактивной мощностью как в индуктивном, так и в емкостном квадрантах. Были сформулированы принципы управления ВПТ на полностью управляемых вентилях при системе преобразования напряжения в переходных режимах, в том числе имеющие целью предотвращение перегрузок оборудования по току и напряжению. Был продемонстрирован процесс внезапного перевода ВПТ в режим работы на автономную нагрузку с переключением ее системы регулирования на поддержание постоянства частоты [32].

Разработка перспектив применения передач постоянного тока в ЕЭС и для связи с энергосистемами других государств

Одним из направлений работ являлось выяснение роли передач и сети постоянного тока в составе ЕЭС [33, 34].

В 2000 г. в НИИПТ была разработана Концепция использования электропередач и вставок постоянного тока в ЕЭС России и для связи ее с энергосистемами других государств. Концепция охватывала перспективу до 2010–2015 гг., применительно к которой были выполнены работы ЭСП «Схема развития ЕЭС и ОЭС России на период до 2010 г.» и ЭНИН им. Г. М. Кржижановского «Стратегия развития электроэнергетики России на период до 2015 г.». Это была комплексная работа, в которой принимали участие несколько научно-исследовательских отделов института, однако отдел электрических систем играл в этой работе ведущую роль.

В Концепции были рассмотрены следующие вопросы:

- использование передач и вставок постоянного тока в мировой электроэнергетике;
- стоимостные показатели электропередач и вставок постоянного тока;
- сопоставительные технико-экономические характеристики передач постоянного и переменного тока;
- перспективные объекты постоянного тока в ЕЭС России и примеры анализа эффективности их применения;
- дальнейшие направления развития техники передач и вставок постоянного тока.

На основе этого рассмотрения были сформулированы основные положения и выводы. Подходы к использованию объектов постоянного тока для связи с европейскими странами и энергообъединениями Азии и Америки изложены в [35–38].

К сожалению, большинство из намеченных в Концепции объектов постоянного тока реализовано не было. В настоящее время представляется целесообразным приступить к разработке новой концепции, которая позволила бы определиться с перспективами развития техники постоянного тока в России. Некоторые результаты предварительного рассмотрения этого вопроса изложены в [39, 40].

Список литературы

1. Важнов А. И., Розовский Ю. А., Салита П. З. Электродинамическая модель энергосистем. – М-Л.: ГЭИ, 1961.
2. Иванов В. П., Кощев Л. А., Черкасский А. В., Шлайфштейн В. А. Учет вставок и многоподстанционных электропередач постоянного тока в расчетах установившихся и переходных электромеханических режимов энергосистем / Совместная работа мощных преобразователей и энергосистем. Сб. научных трудов НИИПТ, 1988.
3. Иванов В. Ф., Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А. Моделирование многоподстанционной передачи постоянного тока в составе сложной энергосистемы // Электричество. 1999. № 5.
4. Герасимов А. С., Ефимова Е. В., Коробков А. В., Шлайфштейн В. А. Моделирование вставки постоянного тока на преобразователях напряжения в среде ПВК «EUROSTAG» // Известия НИИ постоянного тока. 2010. № 64.
5. Дижур Д. П. Метод моделирования на ЦВМ вентильных преобразовательных схем // Известия НИИПТ. 1970. № 16.
6. Дижур Д. П. Моделирование передачи постоянного тока на ЦВМ // Известия НИИПТ. 1971. № 17.
7. Дижур Д. П. Вычислительная устойчивость и погрешность цифровых моделей преобразователей // Труды НИИПТ. Вып. 23, 1976.
8. Дижур Д. П. Цифровая модель энергосистемы с электропередачами постоянного тока // Труды НИИПТ. Вып. 27, 1978.
9. Поляк Г. И. Использование передачи постоянного тока для повышения устойчивости смежной передачи переменного тока // Известия НИИ постоянного тока. 1959. № 4.
10. Кандауров Л. Н., Шлайфштейн В. А. О форсировочной способности передачи постоянного тока, работающей в энергосистеме соизмеримой мощности // Труды НИИПТ. Сб. 18, 1972.
11. Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А., Шмелькин Б. М. Проблемы обеспечения форсировки мощности электропередачи постоянного тока. / Противоаварийное управление и регулирование энергосистем // Сб. научных трудов НИИПТ, 1982.
12. Гущина Т. А., Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А. Вопросы управления мощностью передач постоянного тока от системы противоаварийной автоматики / Проблемы обеспечения устойчивости и надежности параллельной работы энергообъединений // НИИПТ, 1993.
13. А.с. 654122 СССР, МКИ Н 02 J 3/46. Способ регулирования мощности передачи постоянного тока / Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А. 1979.
14. А.с. 849955 СССР, МКИ Н 02 J 3/46. Устройство для регулирования мощности передачи постоянного тока / Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А., Шмелькин Б. М. 1980.
15. А.с. 1443727 СССР, МКИ Н 02 J 3/24. Способ определения форсировочной способности передачи постоянного тока / Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А. 1987.
16. Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А. Преимущества и недостатки связей переменного постоянного тока // Сб. докладов 9-й Международной конференции по противоаварийной автоматике в энергосистемах (на англ. яз), 1994.

17. *Андреюк В. А., Шлайфштейн В. А.* Анализ аперидической устойчивости энергосистемы, содержащей передачу постоянного тока // Известия НИИПТ. 1971. № 17.
18. *Андреюк В. А., Кац П. Я.* Методика учета передач постоянного тока в расчетах статической устойчивости сложных энергосистем // Труды НИИПТ. Вып. 23, 1976.
19. *Шлайфштейн В. А.* К анализу колебательной неустойчивости передачи постоянного тока при значительных реактивностях ее связи с энергосистемами // Труды НИИПТ. Вып. 23, 1976.
20. *Андреюк В. А., Шлайфштейн В. А.* Некоторые результаты исследований аперидической устойчивости энергосистем, содержащих электропередачи и вставки постоянного тока // Труды НИИПТ. Вып. 26, 1977.
21. *Андреюк В. А., Кац П. Я., Шлайфштейн В. А.* Исследование статической устойчивости энергосистемы, содержащей мощную передачу постоянного тока // Труды НИИПТ. Вып. 26, 1977.
22. *Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А.* Области рационального применения линий электропередачи высших классов напряжения переменного и постоянного тока в ЕЭС России // Электрические станции. 2001. № 11.
23. *Балыбердин Л. Л., Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А.* О стоимостных показателях оборудования // Электро. 2011. № 6.
24. *Иванов В. Ф., Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А.* Применение линий электропередачи разных типов и классов напряжения в качестве системообразующей сети ЕЭС России // Электрические станции. 1995. № 12.
25. *Кощев Л. А.* Исследование влияния межсистемных связей постоянного тока на управляемость ЕЭС СССР в аварийных режимах / В книге «Режимная управляемость систем энергетики». – Наука, 1988.
26. *Кощев Л. А., Марченко Е. А., Шмелькин Б. М.* Исследование надежности параллельной работы сложного энергообъединения, содержащего автономно управляемые элементы межсистемных связей / Способы повышения устойчивости и надежности объединенных энергосистем. Сб. научных трудов НИИПТ, 1983.
27. *Зейлигер А. Н., Кощев Л. А., Шмелькин Б. М.* Эффективность использования электропередач и вставок постоянного тока в ЕЭС СССР / Преобразовательная техника в энергетике. Сб. научных трудов НИИПТ, 1986.
28. *Берх И. М., Брандгендлер К. И., Лынова Г. А., Шлайфштейн В. А.* Исследование на электродинамической модели переходных процессов в многоподстанционной электропередаче постоянного тока / Совместная работа мощных преобразователей и энергосистем. Сб. научных трудов НИИПТ, 1988.
29. *Галанов В. И., Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А.* Режимы связанной системы постоянного тока в составе ЕЭС СССР // Известия АН СССР «Энергетика и транспорт». 1988. № 5.
30. *Иванов В. Ф., Шлайфштейн В. А.* Алгоритм работы информационной подсистемы АСУ для ведения режима многоподстанционных передач постоянного тока / Автоматизированные системы управления технологическими процессами крупных подстанций, электропередач и вставок постоянного тока. Сб. научных трудов, НИИПТ, 1991.
31. *Иванов В. Ф., Кощев Л. А., Шлайфштейн В. А.* Управление мощностью многоподстанционной передачи постоянного тока в централизованной системе про-

- тивоаварийной автоматики / Исследования и разработки многоподстанционных электропередач постоянного тока. Сб. научных трудов НИИПТ, 1994.
32. Булыгина М. А., Гущина Т. А., Кирьенко Г. В., Кощеев Л. А., Шлайфштейн В. А. Режимы работы передач и вставок постоянного тока, выполненных на основе преобразователей напряжения // Электрические станции. 2004. № 5.
 33. Кощеев Л. А. Электропередачи постоянного тока. Нужны ли они России? / Электричество. 1999. № 3.
 34. Галанов В. И., Зейлигер А. Н., Иванов В. Ф., Кощеев Л. А. Техничко-экономическая эффективность системообразующей сети постоянного тока // Известия АН СССР «Энергетика и транспорт». 1987. № 6.
 35. Есипович А. Х., Зеккель А. С., Кощеев Л. А., Шлайфштейн В. А. Системные аспекты вариантов организации совместной работы ЭЭС России с энергообъединением стран Центральной и Западной Европы // Известия НИИ постоянного тока. 2001. № 58.
 36. Кощеев Л. А., Adielson T. Европейская электрическая связь Восток – Запад. Исследование электропередач переменного и постоянного тока / Доклад на симпозиуме СИГРЭ, Токио, 1995.
 37. Кощеев Л. А. Перспективы применения техники передачи электроэнергии постоянным током в ЭЭС России и для связи ее с энергообъединениями Европы, Азии и Америки. Сб. тезисов симпозиума «Энергетика-95». – Издание Ленэкспо, 1995.
 38. Кощеев Л. А. Роль электропередач постоянного тока в образовании объединения энергосистем Северо-Восточной Азии / Сб. «Восточная энергетическая политика России и проблемы интеграции в энергетическое пространство Азиатско-Тихоокеанского региона», 1998.
 39. Кощеев Л. А., Мазуров М. И., Шлайфштейн В. А. Перспективы использования передачи постоянного тока в России // Электро. 2008. № 5.
 40. Ефимова Е. В., Коробков А. В., Шлайфштейн В. А. Обсуждение перспективности сооружения в России сверхдальних линий электропередачи // Известия НТЦ Единой энергетической системы, сб. № 2 (67), 2012.

Шлайфштейн Владимир Аронович, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела электроэнергетических систем Научно-технического центра Единой энергетической системы (ОАО «НТЦ ЕЭС»).

E-mail: shlaifshtein_v@ntcees.ru

Shlaifshtein V. A.

System studies of HVDC power transmissions and back-to-backs.

A brief review of studies on the systemic aspects of HVDC power transmissions and back-to-backs applications, carried out by the department of electrical systems from its establishing to the present day is given.

Key words: high voltage direct current power transmissions and back-to-backs, power systems, physical and digital simulation, control characteristics, static stability, fields of application, impact of HVDC on reliability, multi-terminal HVDC power transmissions, back-to-backs using voltage source converters, application prospects.