

УДК 621.311 (091)

*Л. Л. Балыбердин*

## **Развитие техники электропередачи постоянным током высокого напряжения в отечественной энергетике. Вклад НИИПТ в теорию и практику создания ППТ и ВПТ (краткий исторический очерк)**

---

Приводятся технические характеристики ППТ и ВПТ, определяющие их применение в энергетике. Описаны этапы развития техники электропередачи постоянным током высокого напряжения в Советском Союзе и России. Представлен вклад НИИПТ в теорию преобразования тока и в разработку конкретных объектов постоянного тока.

*Ключевые слова: ППТ и ВПТ; история развития; вклад НИИПТ.*

По историческим меркам на решение проблемы передачи электроэнергии постоянным током высокого напряжения ушел сравнительно небольшой срок.

В настоящее время в мировой электроэнергетике введены в эксплуатацию около 100 электропередач и вставок постоянного тока (ППТ и ВПТ) общей отправной мощностью более 60 ГВт. Почти три десятка ППТ и ВПТ строятся и проектируются.

Практически общепризнано, что применение ППТ и ВПТ определяется их специфическими техническими характеристиками, основные из которых:

- с помощью ППТ (ВПТ) осуществляется несинхронная связь между энергосистемами (ЭС), что позволяет регулировать частоту в каждой из них; через них могут объединяться ЭС, работающие с различной номинальной частотой; сбой режима (КЗ, сбросы и набросы мощности) в одной из ЭС не сказываются, практически, на работе другой;
- направление и величину потока энергии можно безынерционно изменять с помощью быстродействующих систем регулирования; законы регулирования могут выбираться независимо от изменений режима (уровней напряжения, частоты) в связываемых ЭС; это позволяет поддерживать частоту, демпфировать колебания и т. п.;
- объединение ЭС переменного тока через ППТ и ВПТ не приводит к увеличению токов КЗ;
- нет ограничений передаваемой мощности по условиям нарушения устойчивости при использовании протяженных ВЛ;
- меньше, примерно в 1,5 раза, зона отчуждения для ВЛ ППТ по сравнению с ВЛ переменного тока; меньше экологическое воздействие на окружающую среду;
- ППТ обладают существенно большей надежностью по сравнению с одноцепной электропередачей переменного тока одинаковой пропускной способности;
- ППТ для перехода через широкие водные преграды с подводным кабелем безальтернативны;
- в перспективе при создании ПЭС с использованием переменной скорости вращения агрегатов ППТ могут найти значительное применение.

В России ППТ и ВПТ могут и должны быть применены везде, где ТЭО будет указывать на их равноэкономичность или предпочтительность по сравнению с использованием связей на переменном токе.

В мире имеется несколько стран, по странному стечению обстоятельств входящих в объединение БРИКС, со схожими природно-географическими, экономическими и демографическими условиями, обуславливающими объективность применения ППТ и ВПТ в их экономиках.

На примере России это связано, прежде всего, с проблемой использования удаленных энергоресурсов для покрытия нагрузки промышленных районов:

- большая протяженность территории страны;
- неравномерное распределение энергоресурсов и промышленности (в Сибири – наибольшие запасы минерального топлива и гидроресурсов, на западе – сосредоточение населения и промышленности);
- сосредоточение далеко от центров потребления перспективных электростанций и островных (труднодоступных) территорий;
- структура ЕЭС России в виде крупных региональных ОЭС, связанных между собой протяженными достаточно слабыми связями, что создает большие трудности обеспечения устойчивости и надежности параллельной работы энергосистем.

Кроме того, предпосылками к использованию техники постоянного тока для связи ЕЭС России с энергосистемами зарубежья являются:

- наличие избыточных энергоресурсов для расширения экспорта электроэнергии, как продукта наиболее глубокой переработки энергосырья;
- сложности объединения на переменном токе с зарубежными энергообъединениями по ряду причин: различный подход к регулированию частоты и мощности, различие в системах автоматики и оперативного управления, рабочих языках, нормативной документации;
- большие расстояния до энергосистем стран, расположенных к югу от границы России;
- наличие водных преград;
- разные стандарты частоты;
- сложности экономических взаиморасчетов из-за наличия большого числа буферных энергосистем до страны получения электроэнергии.

Непременными условиями создания объектов постоянного тока в той или иной стране (собственными силами) являются мощная экономическая база и развитые наука и промышленность, так как из-за высокой технической сложности ППТ и ВПТ они по праву относятся к объектам высоких технологий.

Но вот сложилась парадоксальная ситуация в нашей энергетике: ППТ и ВПТ нужны, они могут дать значительный экономический эффект, мы можем (могли их создавать), а все пока ограничилось двумя действующими объектами постоянного тока.

Уже давно среди определенной части энергетиков считается, что для ЕЭС России ППТ и ВПТ являются каким-то неизбежным злом.

Наряду с апологетами этой техники находилось немало скептиков и прямых противников ее, которые неоднократно навязывали проведение всесоюзных бесплодных дискуссий, в которых ППТ и ВПТ противопоставлялись перевозке угля, трубопроводному транспорту энергоресурсов, линиям электропередачи переменного тока неограниченной длины и т. п. К этому добавлялась еще одна «мысль»: в области ППТ и ВПТ Россия безнадежно отстала от крупных международных компаний, поэтому программу развития ППТ и ВПТ надо отдать в «чужие руки».

Данная статья преследует цель развеять эти сознательные и бессознательные, мягко говоря, заблуждения.

Историю развития техники электропередачи постоянного тока высокого напряжения в отечественной энергетике можно разделить на 3 этапа, начала и окончания которых объективно обусловлены поворотными событиями в жизни страны.

*1-й этап* – середина 30-х годов XX века – начало Великой Отечественной войны в 1941 г.

*2-й этап* – окончание Великой Отечественной войны в 1945 г., восстановление народного хозяйства и дальнейшее его развитие, в том числе энергетики, возрождение исследований и разработок в этой области, создание НИИПТ осенью 1945 г. – начало 90-х годов XX века, смена общественного строя в стране, кардинальное изменение финансово-экономических отношений.

*3-й этап* – 90-е годы XX века – по настоящее время и на ближайшее будущее.

## **Этап первый**

К середине 30-х годов XX века все передачи постоянного тока наиболее совершенной к тому времени системы швейцарского инженера Рене Тюри были демонтированы или переоборудованы для работы на трехфазном токе. Но работы по совершенствованию ППТ не прекращались. Развитие техники передачи постоянным током выделось в применении (взамен динамо-машин) статических преобразователей (выпрямителей и инверторов) на базе дуговых и ртутных вентилей. Такие работы проводились в США, Швейцарии, Германии, Швеции. Было построено несколько опытных линий электропередачи выпрямленным постоянным током.

Большой заслугой отечественных ученых-энергетиков – К. А. Круга, А. А. Чернышева, А. А. Горева, В. А. Толвинского и др. было то, что по их инициативе и в нашей стране в это время велись исследования основных свойств ППТ. В 1937 г. институт «Гидроэнергопроект» с привлечением научных сотрудников ЭНИН, ВЭИ, МЭИ, ЛПИ выполнили эскизный проект мощной высоковольтной ППТ Куйбышев – Москва [1, 2]. Энергетики приветствовали инициативу авторов упомянутых публикаций в острой и технически обоснованной постановке проблемы применения постоянного тока для передачи электроэнергии на дальнее расстояние.

Передача энергии Куйбышевского гидроузла на дальние расстояния (в первую очередь до Москвы: 600–1000 МВт, 850 км) более чем в 4 раза превосходила по параметрам (мощность, расстояние) крупнейшую на то время линию в США. Достигнутое к тому времени у нас напряжение ВЛ 220 кВ, для указанной передачи, было совершенно неприемлемо. Поднять рабочее напряжение до 300–400 кВ в требуемые сроки было большой проблемой. При этом повышение устойчивости электро-

передачи приводило к значительному повышению стоимости электропередачи. Выход авторы публикаций видели в применении ППТ как радикального разрешения проблем статической и динамической устойчивости, перенапряжений и снижения себестоимости. Весомым аргументом в пользу ППТ является вывод о том, что передача энергии порядка 600 МВт и более на расстояние до 1000 км даже при существовавшем на то время уровне техники принципиально осуществима.

Нельзя не отметить высокий уровень проработки технических решений на ППТ Куйбышев – Москва, представленных в эскизном проекте института «Гидро-энергопроект».

Кратко они сводятся к нижеследующему:

В схеме передачи применены два шестипульсных выпрямителя и инвертора по схеме Ларионова с заземленной нейтралью. Напряжение между проводами линии удвоено. Повышающие трансформаторы (выпрямитель) и понижающие (инвертор) защищены с низкой стороны масляными выключателями. С высокой стороны выключателей нет, т.к. включение и отключение линии производится системой управления преобразователями.

Учтена возможность повышения реактивности трансформаторов на 15%.

В качестве вентилях было рассмотрено применение вентилях с ртутным катодом и дуговых вентилях системы Э. Маркса. В первом случае, с учетом достигнутых параметров РВ, предусмотрено их последовательное соединение. Для сглаживания высших гармоник на стороне постоянного тока предусматривались *LC*-фильтры, которые одновременно являлись защитой оборудования подстанций от атмосферных перенапряжений.

Мешающее влияние возврата тока через землю предполагалось уменьшить выполнением глубинного заземления на обоих концах передачи с величиной переходного сопротивления 0,5 Ом.

Если же возврат тока порядка 1000А окажется недопустимым, то предлагалось предусмотреть «металлический» возврат подвеской третьего провода.

В основу режима передачи положен принцип поддержания напряжения постоянным, а не постоянство тока (схема Штейнметца).

Предусматривалась возможность регулируемой частоты вращения отправных генераторов электроэнергии, что позволяло изменять число их оборотов в зависимости от напора, обеспечивая тем самым оптимальный КПД турбины.

Отключение поврежденного провода линии при авариях должно было производиться запирающим выпрямителя и одновременно масляными выключателями на низкой стороне соответствующих трансформаторов на обоих концах линии. Полное время отключения ожидалось 11 мс.

Неудобства от возникновения обратных зажиганий вентилях предполагалось уменьшить быстродействующей сеточной защитой и предварительной формовкой РВ.

Предусматривалось выполнение линии постоянного тока в воздушно-кабельном варианте.

Считалось, что большой эффект даст применение маслонаполненных кабелей (коэффициент перевода приблизительно 2,0) и особенно с компаундным наполнением

(коэффициент 4–5) на постоянном токе, т.е. для данной линии можно будет обойтись кабелем на 110 кВ переменного тока.

В этом случае стоимость кабельной линии не будет превышать стоимости воздушной линии постоянного тока.

При выборе изоляции приходилось руководствоваться материалами зарубежных исследователей, т.к. своих материалов было недостаточно.

Было принято, что отношение постоянного напряжения перекрытия к переменному равно 1,5–1,8 для положительной полярности и 1,8–2,4 – для отрицательной. Это позволяло надеяться сделать линию с напряжением, равным примерно двойному эффективному напряжению переменного тока. Но учитывалось также резкое ухудшение работы линейной изоляции при увлажнении и сильном загрязнении изоляторов. Это, конечно, требовало снижения коэффициента повышения напряжения.

С самого начала работ по Куйбышевской ГЭС было ясно, что проект постоянного тока запаздывает с реализацией, и поэтому предусматривался в дальнейшем перевод, например, двухцепной электропередачи (каждая на своих опорах) переменного тока на постоянный ток переключением проводов первой цепи путем присоединения к полюсу «+», а второй цепи – к полюсу «-».

Расположение проводов одной полярности на одном ряде опор позволяет устранить опасность замыкания между проводами (без «земли»), уменьшить потери и лучше использовать изоляцию для каждой полярности.

Наконец, после эскизного проектирования подстанций, было показано, что подстанция постоянного тока занимает значительно меньше места, чем подстанция переменного тока, и может дать экономию средств.

Но для всех участников работ по электропередачам от Куйбышевской ГЭС было очевидно, что создание ППТ для первой очереди ГЭС к 1944 г. нереально. Нужна была аппаратура, нигде в мире не производимая, с нужными параметрами и в значительных масштабах.

В 1940г. в АН СССР была образована комиссия по работам в области постоянного тока под председательством академика А.А. Чернышева, которой было поручено координировать научно-исследовательские и конструкторские работы по созданию ППТ. Необходимо было создать экспериментальные базы и соорудить опытную линию передачи постоянного тока. Осуществление данных работ было прервано началом Великой Отечественной войны.

## **Этап второй**

Этап начинается с создания в октябре 1945 г. в системе Министерства электростанций Научно-исследовательского института по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения (НИИПТ).

На институт возлагались обязанности решения научных задач в области создания ЕЭС страны, и, главным образом, решения проблем комплексной разработки и практического осуществления дальней высоковольтной передачи электроэнергии постоянным током. Вместе с тем, с самого начала, институт развивался не только как институт преобразовательной техники, а как институт более широкого профи-

ля, как институт техники передачи электроэнергии, необходимой для создания ЕЭС. В тематике работ получили развитие высоковольтное и системное направления и соответствующие научные подразделения.

Необходимость дальнейшего развития техники передачи электроэнергии была осознана в период разработки и реализации плана ГОЭЛРО и в связи со строительством мощных тепловых и гидроэлектростанций еще перед войной, когда и был заложен задел работ по ППТ.

К работам в НИИПТе были привлечены крупнейшие ученые-электроэнергетики. Научным руководителем института стал профессор А.А. Горев. В составе созданного НТС института стали работать академики и члены-корреспонденты АН СССР, доктора наук М. А. Шателен, М. П. Костенко, Л. Р. Нейман, Н. Н. Щедрин, А. М. Залесский, Л. А. Сена и др. Позднее большой вклад в решение проблемы внесли академики В. И. Попков, Н. Н. Тиходеев, Л. А. Мелентьев, В. М. Тучкевич, доктор технических наук Ю. Г. Толстов.

Собственно планомерная исследовательская работа и разработки по ППТ начались в 1947 г.

Два года ушли на поиски места базирования института, разработку его структуры, создание необходимых помещений, автопарка, складов, мастерских, первых испытательных установок и т. д.

Анализируя состав научных лабораторий института этих лет, можно отметить, что формирование и пополнение их шло за счет:

- бывших фронтовиков, окончивших аспирантуру еще до войны или сразу после нее, или окончивших ВУЗ;
- ученых и инженеров, обеспечивавших работу энергосистем страны во время войны;
- молодых специалистов, окончивших ВУЗы страны, получивших направление на работу в НИИПТ.

Этот состав института явился его золотым фондом, оставившим благодарную память о себе своей самоотверженностью, работоспособностью, дисциплиной, беспредельной любовью к делу, инициативностью.

Головной институт расположился в Ленинграде, его отделение – в Москве. Руководителями головного института и его отделения в разные годы были: И. И. Угорец-ст., И. И. Угорец-мл., А. М. Некрасов, М. Р. Сонин, С. Н. Анисимов, В. П. Пименов, А. А. Лебедев, Е. А. Марченко, А. В. Поссе, В. И. Галанов, Л. А. Кошечев.

В 1950 г. была включена в опытно-промышленную эксплуатацию ППТ с подстанциями в г. Кашире и Москве, превосходящая по своим параметрам (30 МВт, 200 кВ, 112 км) подобные передачи за рубежом.

Она предназначалась для проведения исследований и испытаний оборудования, для накопления эксплуатационного опыта и подготовки персонала.

Более подробное описание этой ППТ и других объектов постоянного тока, создававшихся в стране с участием НИИПТа, имеется в многочисленных публикациях. Здесь приводятся только основные их технические параметры, чтобы подчеркнуть:

- каждый из перечисленных объектов был передовым по техническим характеристикам и наиболее крупным для своего времени в мировой энергетике;

- они были выполнены силами отечественных ученых, проектантов и разработчиков оборудования;
- все оборудование было для них изготовлено отечественной промышленностью.

Промышленная ППТ Волгоград – Донбасс имела пропускную способность 720 МВт с годовым объемом передаваемой энергии 4 млрд кВт·ч, напряжение между полюсами 800 кВ ( $\pm 400$  кВ между проводами и «землей»). Длина линии ППТ около 400 км.

Передача могла работать в реверсивном режиме.

Годы создания: начало 1960 г.

В качестве вентилях использовались высоковольтные ртутные вентили.

Интересный факт: ртутные вентили на ПС в Донбассе работали до отключения передачи, т. е. свыше 50 лет. И, может быть, этот факт должен быть отмеченным в Книге рекордов Гиннеса.

Электропередача постоянного тока Экибастуз – Центр была задумана (в середине 1960 годов), как смелый инженерный проект века. Ее мощность достигала 6 млн кВт, ежегодный объем передаваемой по транзитной линии энергии составлял бы 42 млрд кВт·ч., напряжение между полюсами 1500 кВ, расстояние от передающей до приемной ПС около 2400 км.

Впервые в мировой энергетике, было задумано осуществить столь грандиозное сооружение. Но по не зависящим от участников работ причинам работы были прекращены (в последний раз сотрудники НИИПТа выезжали на Экибастузскую ПС в 1987 г.), оборудование списано и демонтировано.

Вставка постоянного тока на ЛЭП 330/400 кВ Россия – Финляндия вводом трех преобразовательных блоков по 355 МВт была осуществлена в 1984 г. (четвертый блок был добавлен в 2000 г.) Вставка в настоящее время является самой мощной в мире (1400 МВт), через нее передается свыше 10 млрд кВт·ч в год. Она проектировалась как неререверсивная, но в начале XXI века на одном из блоков показана возможность ее работы в двухстороннем режиме.

Состояние работ на ней в настоящее время и предложения по ее использованию в дальнейшем изложены кратко в следующем разделе.

Столь значительные объекты, как ППТ и ВПТ в энергетике России, выполнялись большим коллективом специалистов-энергетиков, представляющим такие организации тогдашних Минэнерго и Минэлектротехпрома СССР как: ЭСП, ОДП ЭСП, ВЭИ, ВНИИЭ, НИИПТ, ВИТ, ВНИИКП, ВНИИСК, ВЗВА, ПО «Запорожтрансформатор», ПО «Электровыпрямитель», СВПО «Трансформатор», НПО «Уралэлектротяжмаш», Ленэнерго, ПО «Электроаппарат», ПО «Электрокерамика», завод «Конденсатор», Московский электрозавод, МЭИ, Чебоксарский электроаппаратный завод, завод «Электропульт», трест «Гидромонтаж», персонал сооружаемых подстанций, строительные и наладочные организации и др.

Каждая из организаций выполняла работы по своему профилю. Работы выполнялись в основном по согласованным графикам. В коллективе участников царили взаимное уважение, взаимопонимание, благожелательность, дружба.

На НИИПТ возлагались функции представителя Минэнерго, основного разработчика технических решений по объектам и научного руководителя на всех стадиях.

В частности, на НИИПТ возлагалась разработка технических заданий на нестандартное оборудование ППТ и ВПТ, контроль за его изготовлением, приемка оборудования на объектах, контроль и руководство его наладкой, испытаниями, вводом в эксплуатацию.

Как правило, эти работы выполнялись коллективно в виде комиссий и возглавлялись специалистами НИИПТа.

Минэлектротехпромом и Минэнерго было принято в конце 1960-х годов решение о создании двух мощных испытательных стендов (в г. Тольятти и Белом Расте) для проверки технических решений по нестандартному преобразовательному оборудованию при активном участии ВЭИ и НИИПТа. Стенд в Белом Расте входил в состав Московского отделения НИИПТа, а с его расформированием – в отдел постоянного тока НИИПТа. Состояние, наладка, ввод в эксплуатацию и проведение на них испытаний потребовало значительных усилий сотрудников институтов.

На стендах были проведены испытания ВТВ и частично преобразовательных мостов для ППТ Экибастуз – Центр (г. Тольятти) и Выборгской ВИП (Белый Раст).

Основные работы (по объектам постоянного тока) финансировались из госбюджета, но в случае сбоев подразделениям института приходилось выполнять работы по заказам госпредприятий. Институт в 1960-х годах участвовал в больших работах по электрификации Восточно-Сибирской ж/д. В институте были разработаны и изготовлены первые в городе преобразователи различного назначения: для тяговых подстанций трамвая, троллейбуса, метрополитена, прогрева высоковольтных трансформаторов и реакторов, гальванических установок, циркулярной разгрузки, плавки гололеда на проводах ЛЭП, асинхронного привода трамвая и др.

В зависимости от стоящих перед институтом задач достаточно часто проводились структурные реорганизации подразделений, для работ по постоянному току завершившиеся созданием большого отдела постоянного тока (1986 г.).

Институт в своем развитии стал способным решать все задачи по созданию объектов постоянного тока: по схемам и режимам преобразователей, в разработке ТЗ на нестандартное оборудование, в его наладке, испытаниях, обучении персонала, в создании СУРЗА и АСУ ТП, всех системных вопросов с применением элементов постоянного тока, измерительных систем, вопросов ТВН.

Мировой опыт эксплуатации ППТ и ВПТ с применением высоковольтных ртутных вентилях показал, что достичь необходимой надежности объектов постоянного тока на такой элементной базе невозможно. Из-за недостаточно высоких параметров ртутных вентилях приходилось применять их последовательно-параллельное соединение, что резко усложняет преобразователь. Большие эксплуатационные затраты на вакуумную подготовку вентилях, экологические проблемы показывали, что прогресс в создании ППТ и ВПТ возможен с применением высоковольтных тиристорных вентилях (ВТВ). В НИИПТе за короткий срок были созданы первые в мире ВТВ на напряжение преобразовательного моста 100 кВ с оригинальной системой управления. Первый такой вентиль прошел испытания на Каширской ПС



в 1965 г. Затем на Саранском заводе «Электровыпрямитель» по чертежам НИИПТа были изготовлены 6 вентиляей, которыми был оснащен преобразовательный мост на 100 кВ, 150 А, проработавший непрерывно без единого сбоя свыше 3000 часов.

Позднее ВТВ с воздушным охлаждением на 100 кВ, 300 А был поставлен в один из преобразовательных мостов Волжской ПС электропередачи Волгоград – Донбасс. На Выборгскую ВПТ и ППТ Экибастуз – Центр поставлялись уже более совершенные ВТВ, изготовленные СВПО «Трансформатор», в системе охлаждения которых применялась глубоко химически очищенная вода, световая система управления и др. Вентили, рассчитанные на амплитудное напряжение 740 кВ, ударный ток в амплитуде 20 кА, были созданы с большим опережением зарубежных аналогов.

В заключение этого раздела будет, как представляется, справедливым перечислить, пусть и не полностью, тех сотрудников НИИПТа и других организаций, которые, наряду с упомянутыми ранее руководителями и специалистами, принимали активное участие в разработке проектов ППТ и ВПТ:

- Е. С. Гройс, Д. Е. Кадомский, В. И. Емельянов, А. М. Рейдер, М. Г. Шехтман, Н. И. Лавров, А. М. Пинцов, Ю. С. Крайчик, В. А. Долгих, Н. А. Шипулина, К. А. Герцик, В. А. Иванченко, М. С. Белицкая, Е. М. Берлин, В. Я. Меньшиков, Л. А. Вахрамеев, А. К. Герцик, Л. Л. Балыбердин, В. А. Мержеевский, В. И. Кочкин, С. Д. Мерхалев, В. И. Ширяев, А. К. Манн, К. Б. Гусаковский, Б. С. Мелик-Саркисов, А. И. Боярский, В. А. Андронов, М. И. Мазуров, И. М. Берх, Р. А. Дайновский, Ю. А. Асанбаев, В. П. Тетерин, И. Б. Набутовский, Н. Д. Алексеева, Д. П. Дижур, В. И. Форсиров, И. Н. Шапошников, Н. М. Мельгунов (НИИПТ);
- И. С. Наяшков, В. П. Фотин, И. М. Бортник, В. П. Кулаков, В. В. Левченко, Р. А. Лытаев, Н. С. Лазарев, А. К. Лоханин, Р. Н. Шульга, В. Ф. Баракаев, Х. Ф. Баракаев, А. А. Маслов, О. П. Нечаев, А. И. Федотов, В. А. Вялкин, С. В. Крайнов, В. Г. Спув, Л. В. Травин, В. С. Горшков, Е. Ф. Данькин, Г. В. Панов, А. И. Январев, Е. Ф. Глушков, Л. И. Ройзен, А. И. Ступель, В. Д. Ковалев, А. Г. Мордкович, А. Г. Викулин, А. Д. Коваль, В. В. Худяков, А. К. Мазуренко (ВЭИ);
- С. С. Рокотян, А. В. Миролобов, В. С. Ляшенко, К. Н. Ловковия, А. М. Назаров, А. В. Берковский, М. И. Гольберг, С. П. Давыдов, К. К. Левицкий, С. С. Вильшанская (институт «Энергосетьпроект»);
- Ю. И. Резов, Е. Ф. Резов (СВПО «Трансформатор»);
- М. А. Бики, В. Н. Сурнин (ПО «Запорожтрансформатор» и ВИТ);
- Г. Г. Прочан, С. С. Казаров (Выборгская ВИП).

### **Вклад НИИПТа в теорию преобразования тока**

Создание электропередач и вставок постоянного тока, сложных технических объектов, потребовало развития теории преобразователей, разработки научных основ расчета всей системы ППТ и ВПТ и новых технических решений, как по схемам, так и оборудованию таких электропередач. Конечно, теоретические разработки, проведенные в НИИПТе, основывались на работах предшественников и явились

логическим их продолжением. В силу ограниченности объема настоящей статьи, здесь рассмотрены вопросы развития теории преобразования тока в сокращенном объеме. Более подробно эти вопросы освещены, например, в [3] и многих статьях, опубликованных в научных сборниках «Известия НИИ постоянного тока» и периодических технических изданиях.

Кроме того, предполагается, что в следующем номере «Известий НТЦ Единой энергетической системы» будет опубликована статья «Научные школы НИИПТ – НТЦ ЕЭС». Следует отметить, что все теоретические изыскания НИИПТа носили практическую направленность и использовались при разработке конкретных объектов постоянного тока, в проектной и эксплуатационной практике.

В первую очередь были рассмотрены установившиеся режимы работы преобразователей различного схемного исполнения во всем диапазоне нагрузок от холостого хода до короткого замыкания, при всех возможных углах управления вентилей.

Так, получены аналитические выражения, описывающие работу преобразователей в выпрямительном и инверторном режимах при любом отношении величины индуктивности сглаживающего реактора к величине индуктивности КЗ трансформатора, и получены новые результаты, характеризующие процессы и внешние характеристики преобразователя при малых (реальных) значениях указанного отношения и при малых нагрузках, когда выпрямленный ток прерывист. Рассмотрены схемы преобразователей, традиционных для ППТ и ВПТ:

- трехфазный мостовой шестипульсный преобразователь;
- двенадцатипульсный каскадно-мостовой преобразователь;
- двенадцатипульсный параллельно-мостовой преобразователь;
- двенадцатипульсный выпрямитель с последовательным включением сетевых обмоток трансформатора;
- преобразователи с конденсаторным присоединением.

В процессе исследования были устранены ошибки предыдущих работ, вызванные неполнотой учета режимов, получены аналитические выражения для расчета токов и напряжений преобразователей, предложены методы ограничения аварийных токов КЗ в контуре коммутации и уменьшения повышенных напряжений включением специальных развязывающих цепей между третичными обмотками преобразовательных трансформаторов.

Преобразователь с конденсаторным присоединением – пионерское предложение, было показано, что преобразователь может работать с  $\cos \varphi$  равным единице, и даже выдавать реактивную мощность.

Исследование категории многоимпульсных преобразователей показало, что они обладают рядом общих свойств, не зависящих от схемы. Получены общие зависимости между входом и выходом преобразователей, что позволяет:

- рассчитать кривые входных переменных токов;
- установить связь между полной мощностью и ее составляющими на входе преобразователя и выходными величинами;
- определить действующие значения и начальные фазы гармоник переменного тока порядка  $(n - 1)$  и  $(n + 1)$  по гармонике выпрямленного напряжения, при-

чем при расчете учитывается суммарная индуктивность КЗ обмоток трансформатора и питающей энергосистемы;

- получить общие уравнения для определения угла коммутации  $\gamma$  и для расчета внешних характеристик;
- упростить расчет гармоник переменного тока и выпрямленного напряжения преобразователя путем разложения формул на слагаемые, каждое из которых зависит только от угла управления  $\alpha$  или от суммы  $\alpha + \gamma$ .

Разработан метод разностных уравнений переходных и аварийных процессов в системах с преобразователями, а также для исследования статической устойчивости в зависимости от способа быстродействующего регулирования.

Метод эквивалентного генератора, также разработанный в эти годы, позволяет детально рассмотреть аварийные процессы, возникающие в шестипульсном инверторе при нарушении нормальной коммутации тока, получившей образное название (терминология НИИПТа) «опрокидывание инвертора», при разных значениях угла  $\alpha$ , определить условия возникновения однофазных и двухфазных опрокидываний, рассчитать величину аварийного тока, разработать мероприятия для избежания опрокидывания инвертора и быстрого восстановления его нормальной работы после аварии.

Пользуясь этим методом, можно определить, как на коммутационном процессе сказывается нарастание постоянного тока, это понимание позволяет определить (разработать) технические требования к регуляторам и другим устройствам, действие которых сказывается на протекании переходных процессов.

Одной из важных составных систем теории преобразования являются закономерности, которым подчиняются высшие гармоники напряжения и тока в цепях выпрямленного и переменного токов, примыкающих к преобразователям и во внутренних цепях самих преобразователей.

Можно без всякого преувеличения утверждать, что работы этого направления ввели НИИПТ в число лучших, даже в мировом масштабе, институтов по расчетам гармоник и методам их снижения.

В институте были предложены такие понятия, как гармоники «канонические» (при идеальной симметрии режимов – повторении их с периодом  $2\pi t$ ) и «неканонические» (при отклонении преобразовательных режимов от строгой симметрии).

Доказанная работами НИИПТа инвариантность канонических гармоник по отношению ко многим частным особенностям преобразовательных схем, позволяет использовать одни и те же аналитические выражения для обширной совокупности преобразователей рассчитать гармоники, составить вычислительные программы и разработать похожие методические приемы.

Расчет канонических гармоник выпрямленного тока проводится методом замещения преобразователей эквивалентными источниками гармоник, при этом учитываются не только ЭДС (старый метод), но и внутренние индуктивные сопротивления этих источников. А с учетом собственных емкостей оборудования, наличия демпфирующих и выравнивающих цепей можно рассчитать колебания, которые сопровождают отключения и включения вентилях. Это позволяет определить амплитуды воздействующих напряжений и резонансные области значений учиты-

ваемых параметров на частотах наиболее сильно выраженных канонических гармоник.

Был развит метод гармонического баланса, при котором каждая из учитываемых переменных, влияющих на режимы преобразователя, описывается большим числом канонических гармоник. Комплексы этих гармоник описываются системой линейных алгебраических уравнений, решение которой позволяет определить не только гармоники, но и представить статические характеристики преобразователя.

Сложность примыкающих сетей – не препятствие для применения метода.

Рассмотрены особенности преобразовательных режимов при резонансном усилении одной канонической гармоники в узле примыкания.

Основными факторами, вызывающими неканонические гармоники, являются отклонения углов управления от строгой периодичности, несимметрия и несинусоидальность переменных напряжений преобразователя, неравенство сопротивлений в контурах коммутации вентилях. При задании всех влияющих факторов определенными значениями расчет неканонических гармоник можно вести детерминистскими и вероятностными методами, когда эти факторы – случайные величины, задающиеся распределением вероятностей или числовыми характеристиками таких распределений.

Рассмотрена зависимость неканонических гармоник от преобразовательного режима, в котором они возникают: если углы коммутации  $\gamma$  равны нечетному числу полупериодов этой гармоники, то на стороне переменного тока эти гармоники имеют наибольшие значения. На стороне постоянного тока они наибольшие в тех режимах, при которых углы коммутации равны четному числу полупериодов.

При освоении ППТ Кашира – Москва, аварии, происходившие на ней, потребовали проведение исследований переходных процессов при работе преобразователей, которые показали, что причиной возникновения неполадок являются нарушения нормальных коммутаций как во включающемся, так и в выключающемся вентилях. Теоретическое рассмотрение показало что необходимо учитывать влияние собственных емкостей и индуктивных сопротивлений в контурах с переходными процессами, которые могут вызывать перенапряжения на оборудовании преобразователей.

Процессы можно разделить на три типа:

- колебательные процессы при запертых вентилях (назван режимом «0»);
- переходные процессы при одновременном включении вентилях из-за разбросов в моментах подачи импульсов управления в цепях, содержащих последовательно соединенные вентили или преобразовательные мосты;
- переходные процессы при одновременном включении вентилях из-за отрицательного напряжения на одном из них.

Был определен частотный диапазон колебательных процессов, разделенный на 4 группы от 0 до 3. Диапазон частот лежит в пределах от  $10^6$  Гц до  $10^2$  Гц. Колебательные процессы в зависимости от частоты оказывают различные воздействия на преобразователь и окружающую среду. Высокие частоты создают радиопомехи и перенапряжения импульсного характера. Колебания частотой  $10^4$ – $10^5$  Гц создают колебательные составляющие в токе вентилях позднего включения, вызывают перенапряжения импульсного характера и помехи для связи. Колебания с частотой

тами  $10^3$ – $10^4$  Гц определяют форму восстанавливающего анодного напряжения вентилей и характер коммутации тока вентилями. Колебания последней группы частот – причина формы и величина коммутационных перенапряжений.

Учет этих воздействий позволил определить критерии выбора допустимых разбросов отпираания последовательного соединенных вентилей и минимальной длительности отпирающих импульсов. Особенно большое значение имеет этот вывод для обеспечения надежной работы тиристорных вентилей с последовательным соединением десятков и сотен тиристорных ячеек. Обязателен учет этих параметров для узких импульсов управления (ВТВ со «следящей» системой управления и на фототиристорах).

Следует отметить, что при создании и испытаниях последующих объектов постоянного тока, с учетом приведенных исследований, не было особых проблем. Большой вклад внесли ученые НИИПТа в понимание условий работы высоковольтного оборудования и высоковольтной изоляции мощных преобразовательных ПС ППТ и ВПТ путем глубоко обоснованного выбора преобразовательных схем и параметров преобразовательного оборудования, для разработки системы защиты его от перенапряжений, демпфирования колебательных процессов и устройств автоматического управления, регулирования, защиты и автоматики. Эти исследования имели большое значение для повышения надежности электропередач и вставок постоянного тока и уменьшения их стоимости с учетом того, что в них применяется оборудование, обладающее предельно допустимыми параметрами по напряжению, мощности, габаритам и т. п. Впервые в преобразовательной технике было показано, что комплексное воздействие на оборудование определяется суммой процессов в электропередаче в целом, и процессами, локализующимися в пределах отдельных ПС, преобразовательных мостов и комплектующего оборудования. С учетом этого были разработаны методики координации изоляции электрооборудования высоковольтных преобразователей и защиты от перенапряжений каскадных преобразователей первоначально на основе применения искровых разрядников без токоограничивающих резисторов. Затем была разработана система защиты от перенапряжений, базирующаяся на использовании высоконелинейных ограничителей перенапряжений.

На рабочих встречах с заказчиками и различных форумах неоднократно отмечались высокий теоретический уровень материалов, публикуемых сотрудниками НИИПТа (особенно по методам расчета и борьбы с гармониками от мощных преобразователей) и практическая направленность теоретических разработок. Большим спросом пользовалась и пользуется монография А. В. Поссе «Схемы и режимы электропередач постоянного тока» (– Л.: Энергия, 1973).

В 1980-х годах теоретические исследования НИИПТ показали, что активная фильтрация гармоник в ВЛ ППТ, при которой отслеживаются реальные изменения гармоник тока в линии по частоте, величине и фазе и на них накладываются гармоники от специального генератора, чтобы подавить реальные, очень эффективны. При этом мощность установки активной фильтрации составляет всего 50–100 кВ·А. Бесспорно, это хороший способ не только повысить технические характеристики ППТ, но и снизить ее стоимость из-за исключения из фильтров высоковольтных мощных конденсаторов.

С освоением промышленностью полностью управляемых полупроводниковых приборов – запираемых тиристов (*GTO*, *IGCT*) и мощных транзисторов (*IGBT*) появилась возможность создавать преобразователи, обладающие новыми, ранее недостижимыми, свойствами.

В НИИПТе в 1980-х годах была разработана и исследована схема двенадцатипульсного преобразователя тока с использованием *GTO*-тиристов с шунтовыми конденсаторами (ШК), позволяющего ограничивать перенапряжения, вызываемые быстрыми принудительными коммутациями тока. Кроме того, ШК отфильтровывают высшие гармоники тока и улучшают качество сетевого тока.

По *HVDC Light* технологии в НИИПТе были исследован двухуровневый преобразователь напряжения на *IGBT*-транзисторах с широтно-импульсной модуляцией управления полностью управляемыми вентилями.

Этими работами по сути завершился второй этап развития технологии ППТ и ВПТ в НИИПТе.

### Этап третий

Начавшийся третий этап – самый сложный и непредсказуемый в истории работ по объектам постоянного тока. Хотя по-прежнему энергетика является базовой отраслью российской экономики и устойчивое развитие и надежное функционирование отрасли во многом определяют энергетическую безопасность страны и являются важными факторами ее успешного экономического развития.

Вместе с тем реализация энергетической стратегии России на период до 2030 года столкнулась с такими проблемами, как отставание ввода новых мощностей от прогноза, снижение надежности энергоснабжения, технологическое отставание в создании и освоении парогазовых, экологически чистых угольных и электросетевых технологий, неоптимальная структура генерирующих мощностей, низкая энергетическая и экономическая эффективность отрасли. Решить эти проблемы в России возможно построением «умной» энергетики при эффективном взаимодействии властей, предпринимателей и научного сообщества.

Но новые формы экономики, рыночные отношения, приватизация предприятий энергетики создали такие условия, которые не позволяют напрямую использовать накопленный жизненный опыт для разработки тактики и стратегии исправления создавшегося положения.

К тому же, за последние 20–25 лет в мировой и российской энергетике появилось громадное число новых тенденций экономического, технологического, экологического и т. п. характера, которые исключают старые представления и подходы разрешения проблем и прогнозирования ближайшего будущего энергетики.

Так, в [4] при рассмотрении перспективности сооружения в России сверхдальних линий электропередачи, например, передачи из Сибири в Европейскую часть страны (в вариантах ВЛ 1150 кВ переменного тока, ППТ  $\pm 750$  кВ, настроенные электропередачи) с позиций:

- организации экономически эффективных перетоков мощности между ОЭС (в базисе);
- поставки пиковой мощности от удаленных ОЭС;

- снижения оперативного резерва в ЕЭС;
- использования широтного эффекта связей Восток – Запад,

показано что, во-первых, современная высокая стоимость передачи электроэнергии является барьером для эффективного использования перетоков базисной мощности на большие расстояния.

Во-вторых, наличие ГАЭС в Европейской части страны делает по удельным капиталовложениям неэффективным сооружение, например, ППТ для покрытия пиковой мощности в ОЭС Центра.

В-третьих, оказалось, что сумма максимумов и минимумов нагрузок в отправной и приемной ОЭС практически совпадают из-за весьма пологих графиков загрузки ОЭС, из-за чего связь между ними нецелесообразна.

В-четвертых, нет эффекта от сооружения связи для резервирования ОЭС по сравнению с сооружением резервной генерации, обусловленного затратами на линию связи и ее эксплуатацию. Причем, эффективность снижается по мере роста протяженности связей.

Кроме того, отмечен на настоящее время повышенный рост удельной стоимости линий электропередачи относительно удельной стоимости генерации в 2,2– 2,6 раза, а это существенно снижает эффективность сверхдальнего транспорта электроэнергии.

Правда, в мировой энергетике технико-экономическое обоснование любого крупного проекта должно быть основано на сравнении вариантов по такому экономическому критерию, который учитывает совокупную стоимость владения (*Total Cost of Ownership – TCO*). В таких расчетах учитываются стоимость землеотвода под санитарные нормы, эксплуатационные расходы, затраты и экономию за весь жизненный цикл объекта. Представляется, что сравнение по *TCO* дает дополнительный «плюс» в пользу ППТ (из-за меньших потерь в линии, меньшей площади земли отчуждения).

В дискуссиях о будущем атомной энергетики в России апологеты ресурсосбережения озвучивали ошеломляющие цифры. Резервы энергосбережения в целом по миру составляют 20–25 %, в России – около 40 %. Энергосбережение – самая дешевая и надежная альтернатива вводу генерирующих мощностей и строительству линий электропередачи. Например, рубль, вложенный в энергосбережение дает в 3–4 раза больше электроэнергии, чем рубль, вложенный в строительство АЭС, и при этом не приводит к дополнительным загрязнениям окружающей среды углекислым газом. Сюда же относится борьба с хищениями электроэнергии, которые в частном секторе составляют до 40% объема электропотребления.

Конечно, на старой технике получить хорошую экономию энергоресурсов невозможно. Например, газовые турбины отечественного производства зачастую имеют КПД по году 23–24%. В то же время машиностроители могут создать продукцию на уровне мировых образцов.

Совершенно новое направление энергоснабжения потребителей – распределенная генерация (локальная энергетика – ЛЭ), под которой понимается совокупность организационных, технологических, информационных, технических структур, обеспечивающих производство и потребление электро- и других видов энергии непосредственно в местах потребления. ЛЭ не является технологической частью

ЕЭС, не имеет прямого отношения к большим системным мощностям. ЛЭ представляет технологически совокупность локальных энергетических систем (формулировки из «Терминологии по локальной энергетике»). Реализованные локальные сети имеют напряжение 6–35 кВ, протяженность до 50 км, связывающие в одну ЛЭС совокупность генерирующих мощностей, отдельных предприятий, поселков и т. д.

Крайняя степень локальности – повышение «зеленого статуса» отдельных зданий или группы их, при котором они абсолютно автономны: у них круглый год свои источники тепла, электроэнергии, водоснабжения. Такие дома пущены в эксплуатацию в Германии и пользуются большим спросом.

В материалах II Всероссийской конференции «Развитие малой распределенной энергетики в России» были приведены интересные цифры по состоянию этой отрасли отечественной энергетики в настоящее время и прогнозы на 2025–2030 гг., озвучены предложения по ее более интенсивному развитию формированием государственной политики для преодоления стихийности, о внесении изменений о малой генерации в действующее законодательство или принятии отдельного ФЗ о малой распределенной энергетике, по отмене законодательного запрета на совмещение сетевого бизнеса и бизнеса по генерации, по привлечению внебюджетных средств в эту сферу, о создании стимулов развития когенерации и условий возможности продажи от генераторов ВИЭ в сеть.

На долю малой генерации в зарубежных энергосистемах уже приходится от 10 до 20 % общего объема годовой выработки электроэнергии, в России – 1,5 %. Ожидается, что к указанному выше сроку должно быть введено 60–70 ГВт мощностей малой энергетики. Это позволит сократить ввод мощностей крупной генерации с 173 ГВт до 123 ГВт до 2030 г.

На конференции прозвучал главный тезис – развитие российской производственной и технологической баз по ВИЭ и отказ от импортного оборудования.

Малая распределенная энергетика завоевывает свою нишу. В настоящее время большие производства, для которых риск прекращения электроснабжения даже на несколько часов может обернуться миллионами рублей убытков, наличие собственных энерго мощностей – хорошее решение нескольких проблем. Преимущества: ближе к потребителю, меньше потери в сетях, независимость и серьезный экономический эффект для страны. Поэтому специалисты-аналитики утверждают, что переход от централизованной энергетики к объектам малой распределенной энергетики – трендовая реальность.

Более того, известно, что около половины населения России относится к потребителям, у которых временами или постоянно нет доступа к централизованному энергоснабжению. В силу различных причин (удаленность территории, нестабильность коммуникационных связей с ЕЭС) эта категория потребителей увеличивается еще и сезонно в несколько раз за счет горожан. По мнению многих специалистов, решение проблемы энергоснабжения в таких регионах – создание альтернативных энергоисточников. По мнению многих специалистов-энергетиков альтернативные источники – единственный приемлемый выход из энергетического тупика, в который начинает попадать человечество. Технологические достижения в области альтернативной энергетики позволяют во все более широких объемах применять



солнечные (термальные и фотовольтаику), ветровые, геотермальные, гидроэнергетические, биотопливные установки.

В 90-е годы XX века никакого строительства новых объектов постоянного тока в России не было, за исключением завершения работ по созданию Выборгской ВПТ, где в 2000 г. был введен в эксплуатацию последний, четвертый, преобразовательный блок.

Рассматривая перспективы использования ППТ в Российской энергетике, в эти годы был предложен ряд возможных ППТ, часть из которых неоднократно упоминалась в работах института «Энергосетьпроект», а большая часть не прорабатывалась подробно, но, по мнению НИИПТ, имела определенные преимущества по сравнению с передачами переменного тока [5]. Перечень этих ППТ приведен в табл. 1. Эти ППТ делятся на внутренние объекты и международные. По степени важности и очередности их реализации объекты институтом не разделялись.

В 2007 г. НИИПТ предложил построить одноцепную ППТ с кабельно-воздушной линией от ЛАЭС-2 до ПС Выборгская. Выпрямитель – вблизи ЛАЭС-2, инвертор – на ВПТ с одновременной модернизацией Выборгского преобразовательного комплекса. Основные технические параметры комплекса: напряжение  $\pm 300$  кВ, мощность 1000 МВт, длина линии около 140 км.

Основная цель – повышение уровня устойчивости, надежности и управляемости энергосистемы, оптимизация режимов по условиям минимума потерь и максимального качества электроэнергии. Это должна быть интеллектуальная электропередача за счет использования управляемых элементов сети с высоким качеством устройств и алгоритмов управления в нормальных и аварийных режимах. Дальнейшая проработка этого технического предложения [6] позволила показать, что создание такой передачи позволяет решить ряд задач:

- помимо указанной проблемы модернизации Выборгской ВПТ, предложенная ППТ обеспечивает маневренную связь с ЭС Финляндии, так как передаваемая от ЛАЭС-2 мощность может быть направлена как в сторону Санкт-Петербурга, так и в ЭС Финляндии;
- ППТ замкнет «большое кольцо» вокруг Санкт-Петербурга и значительно повысит надежность его электроснабжения;
- продлением ППТ от ПС Выборгская до одной из ПС 330 кВ Карельской энергосистемы со строительством еще одной, третьей, преобразовательной подстанции решается задача обеспечения баланса мощности и энергии энергосистемы Карелии при выводе из эксплуатации отработавших срок энергоблоков Кольской АЭС и последующем замещении их энергоблоком большей мощности на Кольской АЭС-2.

Предложение не нашло своего воплощения за прошедшие шесть лет. Но в [7] появилось обнадеживающее сообщение о том, что «большое кольцо» предполагается замкнуть за 2014–2015 гг.

Чтобы смотреть в будущее с оптимизмом, необходимо постараться сохранить боеспособную группу квалифицированных специалистов в области техники передачи электроэнергии постоянным током высокого напряжения, пополняя ее по мере надобности молодыми кадрами.

Таблица 1

№ п/п	Тип ППТ	Действующие и перспективные объекты постоянного тока ЕЭС России (географическое расположение)	Мощность, МВт	Длина линии, км
1	Многоподстанционная воздушная	Сибирь – Урал – Центр	2×3000	3500
2	Воздушная	Сибирь – Якутия	500–1000	1000–1500
3	Воздушная	Сибирь – Дальний Восток	1000–2000	1500–2000
4	Воздушная	Томск – Мегион	1000	1000
5	Воздушная	ГЭС на реках Восточной Сибири – Центр (Центральная Сибирь)	2000–5000	1000–4000
6	Воздушная	Мезенская ПЭС – Центр	5000–10 000	1000–1500
7	Воздушная	Панженская ПЭС – Якутия (Дальний Восток)	1000	1500
8	Воздушная	Тугурская ПЭС – Дальний Восток	5000	500–800
9	Воздушная	Коми – Карелия (Кола)	5000	800
10	Воздушная	Ямал – Центр	5000–10 000	2000–3000
11	Воздушная	В пределах о. Сахалин	10	70
12	Воздушная	ЛАЭС – Финляндия	500–1000	200
13	Воздушная или ВПТ	Кола (Карелия) – Финляндия (Швеция)	500	300
14	ВПТ или ППТ	Россия – Норвегия	200	400
15	Многоподстанционная воздушная	Россия – Белоруссия – Балтия – Калининград – Польша – Германия	4000	2000
16	Многоподстанционная воздушная	Россия – Италия	2000–3000	2000–2500
17	Воздушная	Сибирь – Урал – Экибастуз – Средняя Азия	3000	1200–2000
18	Воздушная	Россия – Монголия – Китай	2×(2500–3000)	2000–2500
19	Воздушно-кабельная	Якутия – Сахалин – Япония	5000–10 000	2000–2400
20	Воздушно-кабельная	Сахалин – Япония	5000	1000–800
21	Воздушная	Россия – Корея	1000–3000	1000–1500
22	Воздушно-кабельная	Россия – США	5000–10 000	> 5000
23	Кабельная или ВПТ	Россия – Турция	1000–2000	400
24	Воздушно-кабельная	Штокмановское месторождение – Кола – Норвегия (Швеция, Финляндия)	> 5000	
25	Воздушная	Россия – Иран	1000–2000	500

Обеспечить им возможность творческого участия во всех проектах по объектам постоянного тока и вводе их в эксплуатацию.

Способствовать развитию в стране производства элементов силовой электроники, а не склоняться к пагубной для страны перспективе привлечения к созданию объектов постоянного тока «под ключ» иностранных фирм.

### Список литературы

1. Червоненкис Я. М. Возможности передачи энергии Куйбышевской ГЭС // Электричество, 1938, № 5.
2. Дискуссия по электропередаче Куйбышев – Москва // Электричество, 1938, № 4.
3. Кадомский Д. Е., Крайчик Ю. С., Поссе А. В. Развитие теории преобразования тока // Электрические станции. 1995, №12.
4. Ефимова Е. В., Коробков А. В., Шлайфштейн В. А. Обсуждение перспективности сооружения в России сверхдальних линий электропередачи // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2012, № 2(67).
5. Кощев Л. А. Электропередачи постоянного тока. Нужны ли они России? // Электричество. 1999, № 3.
6. Кощев Л. А., Кутузова Н. Б. К вопросу создания интеллектуальной электрической сети в центральной части ОЭС Северо-Запада с использованием элементов постоянного тока // Известия НТЦ Единой энергосистемы. 2012, № 2(67).
7. Зотин О. Грядущий ренессанс постоянного тока // Энергетика и промышленность России. 2013, № 4, 6, 8.
8. Кузьмицкий В. Конца света не будет // Санкт-Петербургские ведомости. 3.10.2013, № 193.

*Балыбердин Леонид Леонидович*, канд. техн. наук, доцент.

E-mail: nto@ntcees.ru

*Balyberdin L. L.*

**Development of technology of an electricity transmission by HVDC in native power system. Contribution of NIPT to the theory and practice of creation of HVDC and HVDC back-to-back (short historical sketch).**

The technical characteristics of HVDC and HVDC BtB defining their application in an power system are given. Stages of development of technology of an electricity transmission by HVDC in the Soviet Union and Russia are described. The contribution of NIPT to the theory of current transformation and to concrete HVDC objects development is shown.

*Key words: HVDC and HVDC back-to-back, stages of development, contribution of NIPT.*