

Ушедшему, но оставшемуся в сердце и памяти

УДК 621.314.6

А.В. Поссе как новатор в теории и практике мощных вентильных преобразователей

Л.Л. Балыбердин

ОАО «НИИПТ»

Порой приходят в жизнь такие творчески одаренные люди, которые в процессе работы выдают целые россыпи идей. Именно таким генератором новых решений был А.В.Поссе.

Научное наследие А.В.Поссе составляют широко известная в среде специалистов-энергетиков монография, 95 печатных работ и 59 изобретений. Их изложение занимает тысячи страниц технического текста, схем, рисунков, формул, таблиц, графиков и осциллограмм. Весь этот материал явился плодом работы ума, памяти, сердца, рук А.В.Поссе на протяжении почти 65 лет его жизни.

Чтобы оценить с указанной в заголовке статьи стороны все новое и проанализированное А.В.Поссе надо по сути дела повторить его гигантский труд, что, безусловно, невозможно.

Остается только контурно очертить работы А.В.Поссе как новатора-теоретика и новатора-практика в области мощных вентильных преобразователей.

Статьи и изобретения А.В.Поссе посвящены рассмотрению и реализации по-настоящему творческих, новых для своего времени технических решений в преобразовательной технике. Внимательное изучение его наследия показывает, что практически все его изобретения подкреплялись разработкой теоретических основ действия устройств. Это являлось мощным стимулом для использования предлагаемых устройств в практической работе и резко сокращало время от возникновения идеи до воплощения ее, как стало принято говорить, в “металле”.

Трудно сказать, что было первым в том или ином примере решения технической задачи – изобретение или теоретическая проработка. По-видимому, было и то, и другое. Но во всех случаях такой метод взаимного подкрепления помогал наилучшим образом решить новую техническую задачу. В процессе работы над теоретическим

обоснованием устройства рождались новые идеи, которые в свою очередь требовали теоретической проработки и т.д.

Два примера такого подхода к решению проблем приведены ниже. В [1] рассматривается новая схема параллельного соединения 6-пульсных преобразователей для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог, предложенная авторами статьи, и тут же производится теоретический анализ ее работы. Обосновывается необходимость такого анализа большим практическим значением преобразователя с новой схемой. Результаты выполненного анализа дают возможность произвести расчет 12-пульсной преобразовательной установки, определить внешние характеристики и найти все величины, характеризующие ее работу.

При параллельном соединении преобразовательных мостов через уравнивающий реактор разность постоянных составляющих выпрямленных напряжений невозможна. В результате выпрямленное напряжение мостов, питающихся от вторичных обмоток с разным соединением обмоток, принудительно выравнивается, а токи мостов оказываются разными в соответствии с наклоном их внешних характеристик.

Был предложен так называемый секционный делитель [2, 3], представляющий собой серийный трансформатор, осуществляющий трансформаторную связь между линейными токами вентильных обмоток преобразовательного трансформатора. Секционный делитель может быть выполнен либо в виде двух двухобмоточных трансформаторов, вторичные обмотки которых, будучи соединены у одного трансформатора звездой, а у другого треугольником, включены навстречу друг другу, либо в виде одного трехобмоточного трансформатора, где одна из обмоток соединена зигзагом. Следует отметить, что особой заботой авторов при этом было стремление обойтись незначительными изменениями в коммутационной схеме, чтобы обеспечить быстрое ее применение на практике.

В 1958 г. А.В.Поссе получено авторское свидетельство на изобретение «Двенадцатифазный мостовой выпрямитель» [4], основной особенностью которого является последовательное включение первичных обмоток трансформаторов. По группе соединения и коэффициенту трансформации обмотки трансформаторов отличались между собой так же, как и в известной двенадцатипульсной двухмостовой схеме с параллельным питанием трансформаторов. В результате на вторичной стороне получаются одинаковые трехфазные системы

напряжений, сдвинутые относительно друг друга на 30° . Но последовательное питание трансформаторов придает выпрямительной установке особенность – ограничение обратного тока в этой схеме за счет введения в контур обратного зажигания индуктивного сопротивления первичной обмотки трансформатора неповрежденного моста. Рождение этой схемы было вызвано стремлением облегчить работу трансформаторов и ртутных вентилях преобразователя, подверженных обратным зажиганиям.

В результате теоретического исследования предложенной схемы было выяснено, как работает двенадцатипульсный преобразователь с последовательным соединением первичных обмоток трансформаторов в установившихся режимах от холостого хода до короткого замыкания. Были получены уравнения, необходимые для расчета преобразователя, определены его основные характеристики и свойства.

Экспериментальные исследования подтвердили правильность аналитических выводов о работе преобразователя с такой схемой соединения первичных обмоток трансформаторов в установившихся режимах и при переходных процессах в случае обратного зажигания вентиля. Сравнение известной схемы и предложенной показало, что новый преобразователь обладает более высоким коэффициентом мощности, остальные технические характеристики в рабочих режимах у обоих преобразователей примерно одинаковы. Но новая схема позволяет ограничить обратный ток в первый период до 2,5-кратного тока вентиля перед аварией. Уменьшается также скорость спадания аварийного тока примерно в 1,3 раза. Оба обстоятельства снижают опасность обратных зажигания и вероятность их возникновения. Было показано также, что это достигается ценой увеличения скачка обратного напряжения примерно в 1,8 раза по сравнению со скачком в известной схеме.

Доказанные преимущества и возможность детального расчета всех параметров преобразователей по новой схеме открывали путь для ее применения в мощных установках с ртутными и особенно полупроводниковыми вентилями.

А.В.Поссе был выдающимся педагогом, талантливым организатором, доброжелательным человеком. Дар большого ученого, постоянное увлечение новыми идеями, умение увлечь ими других, интеллигентность и доброта, унаследованные им от незаурядных предков, привлекали к нему людей. Он щедро делился идеями, привлекая в

творческий коллектив тех, с кем он в данный отрезок времени тесно сотрудничал в выполняемой работе. Делалось все быстро, буквально в считанные дни, хотя в некоторых работах, например, изобретениях, идея требовала изложения в виде многозвенной формулы. Изобретатели знают по собственному опыту, какой это непростой процесс. А у А.В.Поссе это выходило просто и непринужденно и в таком законченном виде, что патентная экспертиза быстро выдавала положительные решения по заявкам на изобретение.

Столь же стремительно писались статьи и доклады. При этом следует отметить, что статьи печатались в основном в солидных журналах, таких как «Электричество», «Электрические станции», Известия АН СССР «Энергетика и транспорт» (позднее, Известия РАН. «Энергетика»).

Интерес к этим публикациям проявляли зарубежные технические журналы: «Elektrie», «Direct Current», «Power Application and Systems», «Electrical West», перепечатывая многие из них.

Общим для всех публикаций является присущее А.В. Поссе качество изложения достаточно сложного технического материала: простое и четкое и в то же время строгое по форме и существу. Многие из нас не раз убеждались, что при работе с текстом, написанным А.В. Поссе, не удавалось, как говорится, ни убавить, ни прибавить. Классическим примером такой подачи материала является монография А.В. Поссе «Схемы и режимы электропередач постоянного тока», обобщавшая цикл лекций, написанных А.В. Поссе в конце 1960-х – начале 1970-х годов.

За время трудовой и творческой жизни А.В. Поссе вентиляционная техника прошла большой путь от применения маломощных тиратронов до освоения полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов. В своих практических работах А.В. Поссе приходилось опираться на ту элементную базу для преобразования тока, которая была к тому времени. Но теоретические проработки А.В. Поссе далеко опережали имевшиеся технические возможности.

Так, в 1961 г. А.В. Поссе получил авторское свидетельство [5] на изобретение «Компенсатор реактивной мощности». Лабораторный образец предложенного компенсатора в то время мог быть выполнен только с применением низковольтного, маломощного транзистора. Мощный, высоковольтный, полностью управляемый полупроводниковый прибор появился только через 20 лет.

Развитие техники электропередачи электроэнергии постоянным

током высокого напряжения в свое время сдерживалось из-за отсутствия высоковольтных, рассчитанных на большие токи вентилях без применения ртути. В 1957 г. был создан первый тиристор с тремя $p - n$ переходами в пластине кремния. Он был маломощным, низковольтным, и ничто еще не свидетельствовало о возможности его применения в преобразовательной, особенно высоковольтной технике.

А уже в самом начале 1960 годов А.В. Поссе была высказана идея о создании высоковольтных управляемых вентилях для ППТ на основе тириستоров.

Для продвижения высоковольтной тиристорной техники для нужд электропередач, вставок постоянного тока и многих других технических приложений был по инициативе А.В. Поссе создан мощный триумвират в лице академиков АН СССР Л.Р. Неймана и В.М. Тучкевича и проф. А.В. Поссе.

Проблема создания ВТВ решалась успешно и быстро. К ее решению были подключены научный и производственный потенциал нескольких институтов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, НИИПТ, ВЭИ им. В.И. Ленина, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, НИИ завода «Преобразователь») и заводов («Электровыпрямитель», СВПО «Трансформатор», «Преобразователь», опытный завод ВЭИ им. В.И. Ленина).

По настоянию А.В. Поссе в НИИПТ были начаты работы по высоковольтной тиристорной технике, и в начале 1965 г. макетный образец тиристорного вентиля на несколько десятков киловольт успешно прошел испытания на стендах института.

В 1967 – 68 гг. был создан на 100 кВ преобразовательный мост на тиристорных вентилях на электропередаче Кашира – Москва, затем опытный образец вентиля для преобразовательного моста на такое же напряжение для ППТ Волгоград – Донбасс.

В 1972 г. комиссия, созданная из ведущих специалистов по преобразовательной технике трех институтов – НИИПТ, ЭНИН и ВЭИ – рассмотрела три проекта ВТВ и отдала предпочтение проекту, представленному ВЭИ. Высоковольтными вентилями разработки ВЭИ, изготовлявшимися на СВПО «Трансформатор», оснащен Выборгский преобразовательный комплекс на электропередаче СССР – Финляндия и готовилась к оснащению первая очередь электропередачи постоянного тока 1500 кВ – Экибастуз – Центр.

Вентильное оборудование этих объектов постоянного тока отличали передовые технические решения и высокие параметры, и оно

не только ни в чем не уступало лучшим зарубежным аналогам, но и превосходило их (например, по величине рабочего напряжения для преобразователей ППТ Экибастуз – Центр).

Анализ публикаций и изобретений А.В. Поссе позволяет выделить *четыре основные направления исследований*, которым он посвятил свой талант и энциклопедические знания:

общая теория преобразователей и изобретения, реализующие теоретические находки;

теоретические и практические задачи создания электропередач и вставок постоянного тока;

компенсация реактивной мощности;

применение полностью управляемых вентилей в мощных, высоковольтных преобразователях.

По первому направлению исследований А.В.Поссе можно привести изложение нескольких его работ, которые особенно ярко характеризуют его новаторство, глубину и практическую направленность.

В 1957 г. А.В.Поссе один и в соавторстве с В.П.Пименовым опубликовал несколько статей [6, 7, 8], посвященных анализу коммутационных процессов при работе трехфазной мостовой схемы в переходных режимах. Особое внимание при анализе было уделено нарушениям коммутационных процессов в инверторе, получившим образное название опрокидывания инвертора. Вопросы о том, как возникает и протекает опрокидывание инвертора, какими способами можно предотвратить опрокидывание или при его возникновении быстро восстановить нормальный процесс инвертирования без отключения инвертора, имели огромное практическое значение в связи с начавшимся применением электропередач постоянного тока высокого напряжения, внедрением рекуперации на электротранспорте, преобразователей в промышленности. Выбор в качестве объекта исследования трехфазной мостовой схемы объяснялся тем, что она является основным звеном преобразователей. Некоторые из полученных результатов легко распространялись на другие схемы преобразования тока, так как коммутационные процессы во всех схемах преобразования имеют много общего. Не имея возможности остановиться даже на сокращенном изложении аналитического процесса, приведем лишь практическое значение результатов и выводов:

Впервые достаточно полно рассмотрены всевозможные случаи коммутаций тока, которые могут возникать при работе трехфазной

мостовой схемы в переходных режимах.

В переходных режимах протекающие во время коммутационного процесса по обмоткам трансформатора и вентилям токи удобно представлять в виде составляющих, одна из которых – коммутирующий ток двухфазного или трехфазного короткого замыкания. Выпрямленный ток, изменяющийся по величине в переходном режиме, следует разбить на две составляющие: на начальный ток и приращение тока, изменяющееся во времени. Такой подход упрощает анализ и без составления и решения дифференциальных уравнений показывает, из каких составляющих будут состоять все протекающие токи в схеме.

Угол выключения δ инвертора, величина которого играет основную роль для обеспечения устойчивой работы инвертора, зависит от параметров, определяющих режим инвертирования по-разному – в зависимости от диапазона значений угла опережения β ($\beta < 60^\circ$; $60^\circ < \beta < 90^\circ$; $\beta > 90^\circ$).

Нарушение только одной коммутации тока вызывает однофазное опрокидывание инвертора с прохождением тока через два вентиля одной фазы, минуя обмотки трансформатора. Нарушение двух смежных коммутаций тока приводит к двухфазному опрокидыванию инвертора с прохождением длительного тока по обмоткам двух фаз трансформатора.

В преобразователях передачи постоянным током основным средством обеспечения устойчивой работы инвертора при снижениях напряжения приемной сети и повышения тока является автоматическое увеличение угла опережения включения β вентилях. Такое увеличение угла β , сопровождающееся снижением противоЭДС инвертора, не приводит к лавинообразному нарастанию тока благодаря действию регулятора тока, который поддерживает ток выпрямителя постоянным по величине.

При пропуске включения одного вентиля можно избежать опрокидывания инвертора, если отпереть одновременно, после пропуска, два следующих по порядку чередования вентиля с определением β по уравнению “подхвата”.

Пробой или преждевременное включение вентиля инвертора во всем промежутке времени, когда к нему приложено положительное напряжение (за исключением небольшого интервала перед моментом нормального включения), неизбежно вызывает однофазное опрокидывание.

В схеме, например, электропередачи постоянным током, опрокидывание инвертора при действии регулятора тока вызывает лишь кратковременное возрастание тока через вентили, основная составляющая которого – ток разряда линии через линейный реактор. В результате этого обеспечивается возможность автоматического втягивания инвертора в нормальную работу без отключения преобразователей.

Известно, что все эти рекомендации реализованы на практике и без них устойчивая и надежная работа ППТ и ВПТ была бы невозможна.

Очень сложному вопросу работы преобразователей при несинусоидальном напряжении переменного тока была посвящена статья в журнале «Электричество» [9] (совместно с Б.М. Шляпошниковым). Проведено теоретическое рассмотрение влияния несинусоидального напряжения переменного тока на линейные ЭДС вентильных обмоток трансформатора, постоянную составляющую выпрямленного напряжения, внешние характеристики преобразователя, углы коммутации, гармонический состав напряжений и др. Выводы охватывают и выпрямительный, и инверторный режимы. Авторы исходили из того, что переменный ток, потребляемый выпрямителем или отдаваемый инвертором, содержит высшие гармоники, и поэтому напряжение на стороне переменного тока мощного преобразователя всегда является несинусоидальным.

При работе в параллель нескольких преобразователей (электролизная промышленность, электротранспорт, электропередача или вставка постоянного тока), присоединенных к сети переменного тока, различающихся между собой по своим схемам и режимам, электромагнитные процессы в каждом из них должны рассматриваться с учетом взаимного влияния.

Так было доказано, что при параллельной работе двух преобразователей, отличающихся пульсностью или схемой выпрямленного напряжения, линейные напряжения обмоток преобразовательных трансформаторов, соединенных звездой и треугольником, имеют одинаковые действующие значения, но различаются по форме. А это приводит к неравенству постоянных составляющих выпрямленных напряжений преобразователей, присоединенных к обмоткам, соединенным звездой и треугольником, т.е. к разным внешним характеристикам преобразователей и к трудностям параллельной их работы.

В статье было показано, что при наличии в напряжении пере-

менного тока гармоник 5, 7, 17, 19 и т.д. в выпрямленном напряжении содержатся все гармоники, кратные шести. Если в напряжении переменного тока содержатся гармоники 11, 13, 23, 25 и т.д., то в выпрямленном напряжении имеются все гармоники, кратные двенадцати.

Несинусоидальность питающего преобразователь напряжения приводит к разному сдвигу времени перехода кривых линейных напряжений обмоток трансформатора, соединенных звездой и треугольником, через нуль. Это обстоятельство в инверторном режиме приводит к увеличению угла включения вентилях на одном преобразовательном мосту и к уменьшению его на вентилях другого моста, а это может приводить к нарушению нормальной работы преобразователя. Другим следствием работы преобразователя от сети с несинусоидальным напряжением является неравенство углов коммутации в мостах, присоединенных к обмоткам, соединенным звездой и треугольником. В предельном случае при искажениях питающего напряжения гармониками 5, 7, 17, 19 и т.д. угол коммутации на вентилях моста с вторичной обмоткой, соединенной звездой, может возрасти до величины, при которой сумма углов управления α и коммутации γ достигает 180° , времени на восстановление вентильной прочности не остается и нарушается коммутация у инвертора, в результате он опрокидывается.

Известно, что на Выборгской ПС электропередачи Россия – Финляндия в работе на общие шины участвует до 4-х идентичных преобразовательных блоков. Одной из причин аварийных отключений блоков является неустойчивая работа преобразователей при сложных переходных процессах, сопровождающихся искажениями питающих напряжений. Системы управления преобразователями испытывают возмущения при этих искажениях, что приводит к нехваткам углов восстановления вентильной прочности и опрокидываниям инверторов, что практически было предсказано в упомянутой статье А.В. Поссе и Б.М. Шляпошникова.

Цикл статей и докладов А.В.Поссе посвятил разработке общих зависимостей между входом и выходом многофазных преобразователей. При этом многофазный преобразователь тока рассматривался в общем виде как некоторое устройство, к которому с одной стороны (вход) подводится трехфазное напряжение, а на другой стороне (выход) получается выпрямленное (постоянное) напряжение с наложенными на него пульсациями.

Впервые вопрос о зависимостях между переменным током на входе и постоянным током на выходе преобразователей рассматривался М.А.Чернышевым, но только для класса простых m -фазных одноктактных “схем с нулевым выводом” и одноктактных схем с уравнительным реактором. Позднее Б.М. Шляпошниковым было показано, что “закон первичных токов” можно распространить и на другие классы многофазных выпрямителей: для простых схем с разомкнутой вторичной обмоткой трансформатора (одноктактной и двухтактной), для простых двухтактных схем с замкнутой вторичной обмоткой, для сложных схем параллельного и последовательного типа.

А.В.Поссе было выведено более общее доказательство “закона первичных токов”, преимущество которого заключается не только в том, что оно заменяет доказательства предшественников для преобразовательных схем, объединенных по тому или иному признаку в разные классы, но и в том, что оно относится ко всем известным и даже неизвестным преобразовательным схемам, удовлетворяющим некоторым общим условиям. А.В.Поссе удалось найти переменные токи на входе многофазных преобразователей в самом общем виде, не учитывая, из каких элементов и по какой схеме собран преобразователь.

Полученные выводы справедливы для любых многофазных преобразователей, которые при присоединении на входе к трехфазной системе дают на выходе m -пульсное напряжение. Учитывается только одно условие: безынерционное пропускание потока энергии от входа к выходу (равенство мгновенных мощностей на входе и выходе).

Используя общность закона образования первичного переменного тока многофазных преобразователей, А.В.Поссе на примере новых преобразовательных схем, предложенных им, показал практическую полезность сделанного им вывода. Во-первых, входной ток рассматриваемых преобразователей имеет ступенчатую форму, с 12 ступеньками за период. Во-вторых, ступенчатый входной ток симметричен относительно оси, проходящей через амплитуду синусоиды, если амплитуда пульсации совпадает с амплитудой синусоиды ($\tau = 0$), и несимметричен, если $\tau \neq 0$. В-третьих, если выходы преобразователей соединить параллельно, а выходы параллельно или последовательно, то получается 24-пульсный преобразователь и не требуется применения фазосдвигающего трансформатора или соединения обмоток трансформаторов в зигзаг. Последний вывод

без применения рассмотренного принципа совсем не очевиден. В-четвертых, применяя общие уравнения многофазного преобразователя, можно показать, что в рассматриваемых достаточно сложных схемах минимальное число одновременно проводящих вентиляей равно пяти. Наконец, сравнение гармоник в кривых мгновенной мощности на входе и выходе показывает, что каждой гармонике n входного напряжения соответствуют две гармоники ($n \pm 1$) входного тока, действующие значения и начальные фазы которых могут быть без особых трудностей определены по соответствующим уравнениям.

Высокий теоретический и практический уровень работ А.В.Поссе не требует особых доказательств. Есть много фактов в его творческой биографии, которые объективно подтверждают это.

А.В.Поссе было поручено написать для нового в свое время издания «Большой Советской энциклопедии» статью по электропередаче постоянного тока. Ее чтение доставляет настоящее эстетическое удовольствие. Она написана с присущими ему лаконичностью, четкостью, доходчивостью.

По докладу, обобщающему его теоретические и практические разработки, содержащему всего лишь 20 статей и изобретений, представленному в Ученый совет электромеханического факультета ЛПИ в 1964 г., А.В.Поссе единогласно была присуждена ученая степень доктора технических наук.

В 1973 г. в издательстве «Энергия» вышла из печати (затем, к сожалению, никогда не переиздававшаяся) и ставшая библиографической редкостью монография А.В.Поссе [10]. Как сказано в аннотации, в книге рассматриваются принципы построения схем и установившиеся режимы работы передач постоянного тока. В ней основное внимание уделено преобразователям большой мощности и высокого напряжения. Классическое по глубине и доступности понимания положения теории работы преобразователей и применения их в энергетике, пожалуй, не имеет себе равных в достаточно обширной по этому вопросу технической литературе.

Наверное не найдется ни одного специалиста по преобразовательной технике в нашей стране, который не изучал бы ее. Для многих инженеров она была мощным подспорьем в их технической работе, дала импульс новым теоретическим разработкам и изобретениям, нашедшим практическое применение в бурно развивавшейся области электротехники.

Второму направлению – задачам создания в энергетике страны электропередач и вставок постоянного тока посвящено свыше 35 статей и докладов и более десятка изобретений. Освоение опытно-промышленной ППТ Кашира – Москва проходило при активном участии А.В. Поссе, который возглавлял в тот период лабораторию в НИИ постоянного тока. Разработки, проектирование и освоение электропередач Волгоград – Донбасс, Эжибастуз – Центр и вставки постоянного тока на электропередаче Россия – Финляндия пришлось на годы научного руководства НИИПТ А.В. Поссе. Он занимался всеми техническими и организационными вопросами по исследованиям схем, режимов работы электропередач и вставки постоянного тока, выдачей технических требований на нестандартное оборудование этих объектов, приемкой оборудования, его испытаниями, введением в эксплуатацию, сопровождением эксплуатации. Многие вопросы ему удавалось решать непосредственно самому, а еще больше им решалось задач по принятию тех или иных технических решений. Он входил в руководящую группу из трех человек (С.С. Рокотян, В.П. Фотин, А.В. Поссе), на которую двумя Министерствами – Энергетики и электрификации и Электротехнической промышленности СССР – была возложена задача научного руководства создания указанных объектов постоянного тока.

Безусловно, принимавшиеся тогда технические решения основывались на параметрах и характеристиках оборудования, освоенного промышленностью.

Но нельзя не признать, что проектировавшиеся объекты постоянного тока были выдающимися по своим техническим и экономическим показателям, по многим характеристикам опережавшими зарубежные достижения. Тем более понятны та ответственность, которая ложилась на его плечи, и тот объем работы, который ему приходилось выполнять в то время. Несмотря на это он успевал работать над теорией по передачам и вставкам постоянного тока.

Ретроспективный анализ публикаций и докладов А.В.Поссе, написанных лично и в соавторстве, показывает, что на рубеже 50-х – 60-х годов прошлого века много сил и времени отнимали техническая и организационная борьба за возможность использования технико-экономических преимуществ электропередач постоянного тока при передаче больших количеств электроэнергии на дальние расстояния, а также при использовании их в качестве межсистемных связей. Этим вопросам, например, посвящены доклады 1958 и

1960 гг. под редакцией Л.Р.Неймана, содержащие до 60 страниц текста, где с присущей А.В.Поссе убедительностью и доказательностью освящено состояние научных и технических разработок в области передачи постоянного тока высокого напряжения в СССР с рассмотрением и решением таких сложных вопросов как:

технические возможности и экономические показатели применения постоянного тока для дальних электропередач и межсистемных вставок;

свойства и характеристики электропередач постоянного тока;

основные направления развития электроэнергетики в условиях перспективного топливного баланса;

общее направление развития электропередач постоянного тока и области их применения;

перспективные схемы передачи энергии постоянным током и принципы обеспечения надежности их оборудования;

развитие работ по электропередачам постоянного тока.

Среди сугубо технических вопросов рассмотрены состояние и разработка основного оборудования для электропередач постоянного тока – вентиляей, воздушных и кабельных линий постоянного тока, устройств управления, регулирования, защиты и автоматики, силовых трансформаторов, а также принципиальные схемы преобразователей, системы компенсации реактивной мощности, режимные вопросы при коммутационных и аварийных процессах. В статьях и изобретениях по вопросам разработки и создания электропередач и вставок постоянного тока А.В. Поссе решались многочисленные частные технические задачи, направленные на повышение надежности, упрощение эксплуатации, снижение стоимости электропередачи:

обоснование и выбор количества вентиляей в плече моста и количества мостов в преобразователях;

гармонический состав токов и напряжений в примыкающих к преобразователям сетях переменного тока и способы его улучшения;

гармоники в линиях постоянного тока и способы их ограничения;

способы включения линий постоянного тока;

особенности работы неревверсивной электропередачи постоянного тока и др.

Множество вопросов возникало и требовало своего решения в

процессе работы над проектами электропередач и вставок постоянного тока и при наладке, испытаниях, вводе в эксплуатацию и в период эксплуатации на объектах постоянного тока.

Как научный руководитель института и соорудившихся объектов А.В. Поссе считал своим долгом и обязанностью публиковать статьи по техническим аспектам сооружения электропередач постоянного тока Волгоград – Донбасс и Экибастуз – Центр. Известно, что А.В.Поссе принимал непосредственное участие в пусконаладочных испытаниях оборудования на электропередаче Волгоград – Донбасс, обобщая опыт эксплуатации этого объекта и разрабатывая мероприятия по повышению устойчивости и надежности ее работы.

Анализ работ А.В.Поссе *по третьему направлению* – компенсаторы реактивной мощности – дает веские основания сказать, что они пользовались у него особой любовью и вниманием. В основном это изобретения. Написаны заявки на изобретения с такой тщательностью и глубиной, что дополнительных теоретических обоснований просто не требовалось.

Прохождение заявок на предлагаемые изобретения по компенсаторам от момента подачи до признания их изобретениями занимало короткое время. Экспертизе не приходилось долго разбираться в материалах заявок, так как они были предельно логичны, написаны великолепным языком, пояснялись совершенными схемами, четкими осциллограммами и векторными диаграммами.

Как правило, изобретения содержат такой объем сведений, что на их основе можно было приступить к разработке технических требований на изделие и к его запуску в производство.

Можно отметить следующие характерные особенности технических решений А.В.Поссе по компенсаторам реактивной мощности.

Компенсаторы предназначались для использования в электрических сетях и установках с мощными преобразователями. Они должны были обладать высоким быстродействием, возможностью плавного пофазного регулирования реактивной мощности, работать с выдачей и потреблением ее, с низким коэффициентом искажения синусоидальности потребляемого тока.

А.В.Поссе рассматривал только статические компенсаторы реактивной мощности с применением традиционных тиристоров, полностью управляемых вентилей и их комбинаций. В качестве силовой схемы использовалась трехфазная мостовая схема, полюса которой

замкнуты на реактор.

При разработке компенсаторов, исходя из практических соображений, А.В.Поссе всегда стремился к снижению стоимости и наибольшей их надежности. Для реализации этих требований применялись технические решения, обладавшие мировой новизной.

Преобразователи выполнялись многопульсными с числом пульсаций 9, 12, 18, 24 – за период.

Для снижения напряжения, воздействующего на оборудование компенсаторов, и особенно вентилях, схемные обмотки преобразовательных трансформаторов содержали шунтирующие конденсаторы. Для увеличения ресурса вентилях и конденсаторов в режиме потребления реактивной мощности комбинированные вентиля, содержащие выключаемые вентиля и традиционные тиристоры, оставались в работе только традиционные тиристоры, а конденсаторы выводились из работы с помощью коммутационной аппаратуры.

В многомостовых схемах компенсаторов, необходимых для многопульсности работы, надежность увеличивалась за счет ограничения аварийных токов до величины, допустимой по кратковременной перегрузке выключаемых вентилях, выбранных по рабочему току, оптимизации законов управления в разных мостах компенсатора и оптимизации мест расстановки специальных фильтрокомпенсирующих устройств.

При анализе изобретений А.В.Поссе по статическим компенсаторам реактивной мощности бросается в глаза глубокое проникновение автора в физическую суть работы многопульсных схем. Известно, что многопульсность обеспечивается либо сдвигом питающих преобразователи напряжений на определенный угол, либо подачей отпирающих вентилях импульсов по особому закону. И тот, и другой способы А.В.Поссе применял с изумительными изобретательностью и изяществом.

В изобретениях А.В.Поссе используются многообмоточные трансформаторы одностержневые и двухстержневые, групповое соединение однофазных трансформаторов, обмотки с отпайками с различными коэффициентами трансформации, соединение обмоток в звезду, треугольник и зигзаг, особая организация нулевых выводов обмоток, фазопоротные трансформаторы и др. Векторные диаграммы, объясняющие достижение фазового сдвига питающих напряжений, поражают своей сложностью и в то же время – доступ-

ностью и убедительностью.

Четвертое направление в работе А.В.Поссе начинается с уже упоминавшегося [5] поистине пионерного изобретения, в котором он еще в 1960 г. предложил использовать в статических компенсаторах уникальное свойство выключаемых вентилей – прерывать ток подачей запирающих вентили импульсов на электрод управления, обеспечивая принудительную коммутацию тока с отрицательными углами регулирования. При этом преобразователь не потребляет, а выдает реактивную мощность, пропорциональную синусу угла управления.

Обладая обостренным чувством нового, А.В.Поссе задолго до появления полностью управляемых полупроводниковых приборов с параметрами, приемлемыми для применения в силовой преобразовательной технике, последовательно и с увлечением начал разрабатывать теоретические аспекты схем и режимов преобразователей на их основе. При этом он руководствовался несколькими предложенными им положениями, которые красной нитью проходят по всем его теоретическим разработкам и изобретениям.

1. Преобразователь выполняется многоимпульсным, чтобы уменьшить гармоники тока как на стороне переменного, так и постоянного тока.

2. Схемные обмотки преобразовательных трансформаторов снабжаются шунтовыми конденсаторами для ограничения перенапряжений с кратностью не более 1,5.

Оптимальные результаты в отношении ограничения перенапряжений получаются, когда собственная частота колебаний в контуре, образованном емкостью шунтовых конденсаторов C и индуктивностью L_2 короткого замыкания схемной обмотки преобразовательного трансформатора, близка к 450 Гц.

Расчеты показали, что при относительном значении индуктивного сопротивления короткого замыкания вентильной обмотки преобразовательного трансформатора около 0,1 мощность шунтовых конденсаторов составляет 15 – 20% от мощности преобразователя.

Фильтрующее действие шунтовых конденсаторов на схемных обмотках трансформаторов с преобразователем на запираемых вентилях приводит к 2,5 – 3-х кратному снижению коэффициента искажения синусоидальности сетевого тока по сравнению с обычным 12-пульсным преобразователем с незапираемыми вентилями.

Можно еще больше повысить качество сетевого тока путем

включения последовательно с сетевой обмоткой преобразовательного трансформатора трехфазного реактора с тем, чтобы повысить суммарную индуктивность контура, образованного этой индуктивностью L и емкостью шунтового конденсатора C . Значение собственной частоты этого контура должно быть порядка 200 Гц.

Шунтовые конденсаторы на схемных обмотках преобразователей с использованием запираемых вентилях позволяют осуществлять принудительные коммутации тока за очень малые промежутки времени – порядка 10 – 100 мкс.

В балансе реактивной мощности, выдаваемой или потребляемой преобразователем с запираемыми вентилями, учитывается и реактивная мощность от шунтовых конденсаторов.

3. При создании 12-пульсных преобразователей полезно каждый из мостов питать от трехфазных трехобмоточных трансформаторов, вентильные обмотки которых соединены звездой и треугольником, а между третичными обмотками введены реактивные двухполюсники. Параметры элементов двухполюсника (C и L) рассчитываются такими, чтобы исключить 5 и 7 гармоники в напряжениях вентильных обмоток и шунтовых конденсаторов. Это позволяет в преобразователе на полностью управляемых вентилях снизить максимальное анодное напряжение вентилях примерно на 10%, и из-за уменьшения загрузки шунтовых конденсаторов высшими гармониками тока, снизить действующее значение их токов в 1,4 раза. В результате уменьшается установленная мощность шунтовых конденсаторов. Положительные технические эффекты от применения двухполюсников достигаются некоторыми дополнительными затратами, так как мощность конденсаторов и реакторов двухполюсников достигает 10 и 5% номинальной мощности преобразователя соответственно. Но эти затраты с лихвой компенсируются уменьшением стоимости запираемых вентилях и шунтовых конденсаторов.

О практической направленности теоретических работ А.В. Поссе свидетельствует глубокий анализ установившихся режимов работы наиболее привлекательного для применения 12-пульсного преобразователя с одним трехобмоточным трансформатором, двумя мостами на запираемых вентилях и шунтовыми конденсаторами. Им было показано, какие особенности имеет анодное напряжение вентилях в зависимости от значений индуктивности короткого замыкания сетевой обмотки трансформатора. Сложность задачи связана с тем, что анодное напряжение содержит колебательную составляющую

щую, форма которой зависит и от параметров трансформатора, и от емкости шунтовых конденсаторов, а величина – от тока нагрузки преобразователя.

Целью исследований являлся поиск оптимальных параметров оборудования преобразователя, в котором существенно уменьшена колебательная составляющая в напряжениях на вторичной стороне преобразовательного трансформатора. В свою очередь уменьшение амплитуды колебательной составляющей напряжения питания преобразователя приводит к уменьшению величины максимального напряжения, воздействующего на запираемые вентили и все другие элементы преобразователя. Такое уменьшение воздействующего напряжения определяет в конечном счете стоимость преобразователя и в большой мере – его надежность.

Начиная работу над теорией преобразователей с использованием полностью управляемых вентилях, А.В.Поссе понимал, что является одним из первопроходцев в этой области техники. Например, он встретился с терминологическими трудностями при обозначении новых типов преобразователей и процессов в них, введя в обиход такие, например, новые понятия как “самокоммутируемый” и “обратимый” преобразователь.

Под самокоммутируемым преобразователем следует понимать преобразователь на базе запираемых вентилях, в котором коммутация тока происходит за счет включения и отключения запираемых вентилях импульсами управления независимо от знака приложенных к ним напряжений.

Под обратимым преобразователем понимается преобразователь, могущий работать как выпрямителем, так и инвертором.

Основное преимущество преобразователей на базе запираемых вентилях связано с возможностью их работы не только с положительными, но и с отрицательными углами регулирования, то есть преобразователь может работать в четырех квадрантах.

Таким образом, в выпрямительном и инверторном режимах при углах регулирования соответственно $\alpha < 0$ и $\beta < 0$ преобразователь, передавая активную мощность P , работает с опережающим сетевым током и выдает в энергосистему реактивную мощность Q . Возможны также режимы с $Q = 0$, когда P больше или меньше 0, а также режим компенсатора реактивной мощности, когда Q больше или меньше 0, а $P \cong 0$ (то есть потребляемая активная мощность расходуется только на потери в оборудовании преобразователя).

До А.В.Поссе вопрос о том, как происходит коммутация тока в преобразователе тока с запираемыми вентилями при отрицательных углах регулирования, не был освещен в технической литературе. Более того, встречались утверждения, что такая коммутация невозможна, поскольку к вентилю в момент его отпирания приложено отрицательное анодное напряжение. А.В. Поссе провел такой анализ применительно к однофазному преобразователю трехфазного тока в постоянный и обратно [11]. Он показал также, что в преобразователях тока с запираемыми вентилями, выполненных по другим схемам, процесс коммутации при отрицательных углах регулирования имеет такой же характер. Рассмотрение было проведено с учетом общепринятых допущений: ЭДС питания и выпрямленный ток постоянны в промежутке коммутации, проводимость емкостей выше проводимостей плеч моста с запертыми вентилями и др.

Запираемый вентиль, включенный в каждое плечо моста, содержит одну ячейку, в которую входят запираемый вентиль и присоединенная параллельно к нему цепь с конденсатором, резистором и диодом, шунтирующим резистор. Последовательно с вентилем введен анодный реактор для ограничения скорости нарастания анодного тока. Очевидно, что при высоких напряжениях преобразователя запираемый вентиль должен состоять из нескольких таких ячеек, включенных последовательно.

Были получены аналитические выражения для расчета токов и напряжений коммутирующих вентилях при работе преобразователя в выпрямительном режиме с углами регулирования α в диапазоне $[0; -90^\circ]$, а также при работе в инверторном режиме с углами регулирования β в диапазоне $[0; -90^\circ]$.

Анализ процесса коммутации тока в преобразователе с запираемыми вентилями при отрицательных углах регулирования позволил сделать следующие выводы.

1. Включение каждого очередного вентиля обеспечивается запираемостью другого вентиля, парного с ним в процессе коммутации, и возникающим при этом переходным процессом с быстрым нарастанием анодного напряжения очередного вентиля из отрицательной области в положительную.

2. В течение малого промежутка времени от запираемого одного вентиля до включения следующего по порядку отпирания (десятки мкс) через конденсаторы этих вентилях проходят токи, содержащие

одинаковую постоянную составляющую, равную $1/3$ постоянного тока преобразователя, и двухчастотную переменную составляющую.

3. Длительность промежутка времени от запираания одного вентиля до включения следующего по порядку отпираания возрастает при уменьшении тока нагрузки преобразователя и увеличении абсолютного значения угла регулирования.

4. Ширина отпирающих импульсов должна быть больше максимально возможного значения промежутка времени.

5. Для ограничения максимально возможного промежутка времени необходимо, чтобы преобразователь не работал при токе, меньшем некоторого минимального. Величина этого минимального тока зависит от максимально возможного промежутка времени и наибольшего по абсолютной величине угла регулирования, при котором предусмотрена работа преобразователя.

А.В.Поссе, в силу определенных обстоятельств, основное внимание при исследованиях многопульсных преобразователей с использованием выключаемых вентилях уделил преобразователям тока. Только незадолго до своего ухода из жизни несколько своих изобретений и теоретических работ он посвятил рассмотрению преобразователей напряжения.

Одна из последних работ содержит анализ способов регулирования реактивной мощности инвертора напряжения при постоянстве активной мощности [12]. В ней определены области допустимых значений регулирующих параметров, не допускающих перегрузки инвертора, приведены графики и таблицы, показывающие возможности регулирования инвертора, и уравнения для расчета регулирующих параметров по заданным значениям активной и реактивной мощностей инвертора. И, наконец, даны рекомендации по практическому применению рассмотренных способов регулирования для инверторов вставок и передач постоянного тока.

А.В.Поссе рассматривает три способа регулирования. Он исходит при этом из того обстоятельства, что регулирование активной P и реактивной Q мощностей инвертора напряжения может производиться изменением постоянного напряжения U , коэффициента трансформации K и угла регулирования β .

Если для регулирования использовать только один параметр, то получится взаимно-однозначное соответствие значений P и Q . Это для энергетического объекта неприемлемо. Для обеспечения работы инвертора напряжения с любым допустимым сочетанием значений P

и Q , нужным энергосистеме, необходимо регулирование по двум параметрам. Это можно выполнить тремя способами. Первый способ реализует изменение U и β , второй – K и β , третий – U и K . Допустимые значения регулирующих параметров определяются областью, в которой инвертор напряжения работает без перегрузки трансформатора.

Все три способа регулирования активной и реактивной мощностей инвертора напряжения могут применяться для любых установок, в которых инвертор получает питание от регулируемого выпрямителя. Предпочтительней применять третий способ регулирования Q при постоянстве P изменением коэффициента трансформации (устройством РПН трансформатора) и постоянного напряжения на входе инвертора. При этом не нужны малые, очень трудно осуществимые изменения угла β , необходимые для первого и второго способов. В статье приведены диапазоны изменения угла β при регулировании Q при постоянстве P , например, по первому способу. И на самом деле это трудно осуществимый способ, так как угол β необходимо изменять лишь на доли градуса при изменении Q в несколько десятков раз.

Не имея возможности подробно остановиться на других работах А.В.Поссе по преобразователям с использованием выключаемых вентилях, укажем только те исследования и изобретения, которые дополняют сказанное выше по этому направлению.

Предложен так называемый комбинированный вентиль, в состав которого входят запираемые и незапираемые вентили и конденсаторы [13].

Рассмотрена коммутация тока в преобразователе с комбинированными вентилями с выводом аналитических выражений, позволяющих рассчитать параметры комплектующих элементов преобразователя, продолжительность коммутационного процесса, напряжение конденсаторов в промежутке непроводимости комбинированного вентиля, токи полупроводниковых приборов и напряжение конденсаторов комбинированных вентилях в процессе коммутации.

Обоснованы технические характеристики 12-пульсного, перспективного для электроэнергетики преобразователя, в котором третичные обмотки двух трансформаторов, от которых получают питание два трехфазных мостовых преобразователя, объединены через реактивные двухполюсники. Их применение повышает надежность преобразователя из-за уменьшения перенапряжений примерно в 1,5

раза. Кроме того, в напряжениях шунтовых конденсаторов пятая и седьмая гармоники снижаются практически до нуля.

Предложен 12-пульсный инвертор напряжения, содержащий два одинаковых импульсных инвертора, управляемых при неравенстве углов регулирования β_1 и β_2 .

Предложен квази-24-пульсный преобразователь, состоящий из двух 12-пульсных преобразователей, работающих с разностью углов управления, равной 15° .

Подробно рассчитаны параметры оборудования и характеристики 24-пульсного инвертора с запираемыми вентилями.

Предложено повышение надежности 12-пульсного самокоммутируемого преобразователя путем такого выполнения плеч вентильных мостов, при котором происходят постепенные коммутации тока – нарастание и спадание тока плеча при включении и отключении запираемых вентилях происходит в течение промежутков времени примерно таких же, как и при естественных коммутациях тока обычными тиристорами.

Теоретически и путем испытания макета преобразователя с запираемыми вентилями на физической модели энергосистемы доказана высокая устойчивость самокоммутируемого преобразователя при любых КЗ в приемной энергосистеме. После ликвидации КЗ преобразователь быстро восстанавливает доаварийный режим работы вставки или электропередачи постоянного тока. Преобразователь может работать как автономный инвертор, выдавая активную и реактивную мощность в энергосистему, не имеющую других источников электроэнергии.

В заключение этого раздела следует отметить три особенности в работе А.В.Поссе по преобразователям на запираемых вентилях:

основным схемным элементом преобразователей в его теоретических работах и в изобретениях по данному направлению является трехфазная мостовая схема;

А.В.Поссе не рассматривал применение в преобразователях широтно-импульсной модуляции. Для этого у него не хватило времени;

стремясь как можно быстрее видеть свои разработки реализованными в объектах постоянного тока, А.В.Поссе много сил и времени затратил на создание и испытания макетных образцов преобразователей на запираемых вентилях, которые могли бы лечь в основу опытных образцов этой техники. Так, уже в конце 80-х годов им был

предложен и в отделе постоянного тока НИИПТ изготовлен и успешно испытан многофазный компенсатор реактивной мощности с использованием ГТО-тиристоров.

В начале 90-х годов А.В.Поссе разработал отвечающие всем положениям технические требования на самокоммутируемый обратимый преобразователь на полностью управляемых вентилях для замены комплектных высоковольтных преобразовательных устройств (КВПУ), которыми оснащена Выборгская вставка постоянного тока электропередачи Россия – Финляндия. Эти предложения опередили свое время, о чем свидетельствует тот факт, что до сих пор в энергетике России не создано ни одного подобного преобразователя.

Давно замечено, что технические достижения устаревают гораздо быстрее, чем произведения искусства и литературы. Интеллектуалам-техникам достается гораздо меньше лавровых венков, чем их собратьям – гуманитариям. Тысячестраничному нерядовому роману потом посвящаются десятки тысяч страниц рецензий, воспоминаний, диссертаций. Имена авторов гуманитарных шедевров помнят многие последующие поколения. В технике, как правило, все заканчивается с уходом следующего поколения после ухода таланта.

Поэтому, завершая статью, хочется пожелать поколениям, идущим на смену поколению ученых, к которым принадлежал Андрей Владимирович Поссе, освоить их творческое наследие и продолжить его, взяв на вооружение их увлеченность и преданность делу, которому они посвятили всю свою жизнь, их целеустремленность и трудолюбие.

Список литературы

- [1] **Поссе А.В., Размадзе Ш.М.** Параллельная работа шестифазных выпрямительных установок с трансформаторами «звезда – две обратные звезды» и «треугольник – две обратные звезды» // Известия АН СССР. ОТН. Сер. Энергетика и транспорт. 1960. № 4.
- [2] **А.с. 83475 СССР, МКИ 21 d², 12₀₂.** Многофазный выпрямитель / А.В.Поссе, Б.М. Шляпошников. Оpubл. 01.01.1950.
- [3] **А.с. 89291 СССР, МКИ 21 d², 12₀₃.** Многофазный выпрямитель / А.В.Поссе, Б.М. Шляпошников. Оpubл. 01.01.1950.
- [4] **А.с. 114549 СССР, МКИ 21 d², 12₀₂.** Двенадцатифазный мостовой выпрямитель / А.В.Поссе. Оpubл. 01.01.1958.
- [5] **А.с. 136453 СССР, МКИ 21 d², 12₀₃.** Компенсатор реактивной мощности / А.В.Поссе. Оpubл. 1961. Бюл. № 5.

- [6] **Пименов В.П., Поссе А.В.** Опрокидывание инвертора // Электричество. 1956. № 6.
- [7] **Поссе А.В.** Коммутационные процессы при работе трехфазной мостовой схемы в переходных режимах // Известия НИИПТ. 1957. № 1.
- [8] **Пименов В.П., Поссе А.В.** Опрокидывание инвертора // Известия НИИПТ. 1957. № 1.
- [9] **Поссе А.В., Шляпошников Б.М.** Работа ионных преобразователей при несинусоидальном напряжении переменного тока // Электричество. 1952. № 3.
- [10] **Поссе А.В.** Схемы и режимы электропередач постоянного тока. Л.: ЛО изд-ва «Энергия». 1973.
- [11] **Поссе А.В.** Коммутации тока в преобразователе с запираемыми вентилями при отрицательных углах регулирования // Известия РАН. Энергетика. 1993. № 1.
- [12] **Поссе А.В.** Регулирование активной и реактивной мощности инвертора напряжения // Известия РАН. Энергетика. 2000. № 4.
- [13] **Пат. РФ 2119712, МКИ Н02 М 7/12, 7/19.** Комбинированный вентиль тока / Л.Л.Балыбердин, Д.В.Бородич, М.К.Гуревич, А.В.Поссе, Ю.А.Шершнеv. Оpubл. 27.09.1998. Бюл. № 27.