

*Доктор технических наук,
профессор
Бойко
Валерий Степанович*

АКАДЕМИК ЧИЖЕНКО -ОСНОВАТЕЛЬ НОВОГО НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Когда мне предложили выступить с докладом на указанную тему, я не предполагал, что ответ на многие вопросы придется искать в архивных материалах, хотя я достаточно хорошо знаком с научной деятельностью Ивана Мироновича.

В 1966 году я поступил в аспирантуру при Киевском политехническом институте на кафедру теоретических основ электротехники. Моим научным руководителем был тогда еще не академик, но уже весьма авторитетный ученый, лауреат Ленинской премии в области науки и техники, доктор технических наук, профессор Чиженко Иван Миронович.

В это время он был на гребне славы. И не только из-за получения Ленинской премии.

К тому научному направлению в энергетической электронике, которым он по праву является основателем, был громадный интерес со стороны промышленных предприятий. Развитие направления предполагалось не только количественное (расширение отраслей народного хозяйства, где компенсационные преобразователи могли найти эффективное применение), но и качественное.

Существо качественных изменений в энергетической электронике в то время заключалось в переходе на более прогрессивную элементную базу – полупроводниковую. Замена ртутных и различного типа ионных приборов на полупроводниковые ставила ряд научно-практических задач, решать которые надо было в сжатые сроки.

Можно сказать, что и я был причастен к этому, поскольку темой моей кандидатской диссертации было “Исследование электромагнитных процессов в мощных полупроводниковых компенсационных выпрямителях”. В этот же период в г. Запорожье на Днепровском алюминиевом заводе монтировался первый полупроводниковый компенсационный выпрямитель на 850 В, 12500 А, в наладке которого мне пришлось участвовать вместе с коллегами по кафедре Кудрей Е.А. и Шуляком А.А.

Таким образом, начиная с 1966 года имело место тесное и плодотворное сотрудничество с Иваном Мироновичем по основной научной кафедральной тематике “Исследование компенсационных преобразователей”. Вместе с тем работа над текстом доклада поставила некоторые вопросы, на которые лучше смог бы ответить сам Иван Миронович, если бы ему было суждено дожить до своего 100-летнего юбилея.

Вопрос первый. С чего все началось? Представляется, что достаточно убедительным будет ответ, который содержится в выступлении Ивана Мироновича на защите моей докторской диссертации в качестве научного консультанта. Ниже приведена часть стенограммы выступления, касающаяся существа работы.

“Позвольте мне в несколько свободном стиле рассказать об истоках этой работы, ее теоретическом существе, о перспективах и направлении исследований в будущем.

Сразу отмечу, что направление это чрезвычайно важное для народного хозяйства и большой энергетики. Компенсационные преобразователи призваны совершить большую революцию в большой энергетике.

Начало этого направления в преобразовательной технике относится к тридцатым годам. Все пошло от Г.И. Бабата и Я.А. Кацмана. Они занимались маломощными устройствами на тиратронах. Толчок применению этой идеи в устройствах большой мощности дали разработки для передач энергии на постоянном токе. Там есть многие проблемы, а одна из них – компенсация реактивной мощности. Мы занялись этой проблемой и разработали преобразователь с высокими энергетическими характеристиками для промышленности. Они широко внедрены в цветную металлургию и электрифицированный транспорт.

Прежде чем перейти к перспективам, я хотел бы остановиться на стержневом теоретическом вопросе во всех этих работах. Многие исследователи задумывались, нельзя ли найти другие альтернативные способы выпрямления переменного тока. Работы в этом плане ведутся, и особенно интенсивно в последнее время. Однако, наиболее перспективное направление – изменение условий коммутационного процесса. Эти исследования диссертант выполнил на высоком теоретическом уровне и показал возможности разработанных преобразователей по эффективному генерированию реактивной мощности.

Но надо иметь в виду (я хочу ответить на вопрос оппонента), что предложенные решения, это не только выпрямитель или инвертор, это и регулятор, это может быть компенсатор или защитный элемент. Поэтому я и верю, что эти преобразователи сделают революцию в большой энергетике. Все работы, выполняемые в этом направлении, перспективные и обнадеживающие.”

Как следует из приведенного выступления, первые исследования в области компенсационных преобразователей были ориентированы на потребности передач постоянного тока. Это же подтверждают и архивные материалы.

Отчет кафедры “Центральных электрических станций” по научно-технической работе “Генерирование реактивной мощности на инверторных подстанциях дальних линий передачи постоянного тока” за январь 1951 г.-июнь 1952 г. подписан зам. директора по научной работе проф., докт. техн. наук Писаренко Г.С., начальником отдела НИР доцентом Уласиком В.Л., руководителем работ по постоянному току профессором Орловским А.В., руководителем темы и исполнителем доцентом Чиженко И.М. По существу рассматриваемого вопроса в отчете отмечается.

“Электрическая энергия от новых сверхмощных электростанций должна быть передана в промышленные районы страны. Потребуются новые линии электропередач на дальние и сверхдальние расстояния. Как показали работы советских ученых такие линии электропередач целесообразно выполнять на постоянном токе высокого напряжения. С целью освоения проблемы передачи энергии постоянным током высокого напряжения законом о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946-1950 г.г. были предусмотрены специальные научно-исследовательские работы. Создан научно-исследовательский институт постоянного тока при МЭС СССР. Сооружена и осваивается первая линия передачи постоянного тока высокого напряжения промышленного типа.

Успешно проводятся по этой проблеме научно-исследовательские работы в ряде научно-исследовательских институтов – ЭНИИН, НИИПТ и ряде высших учебных заведений

В новых передачах постоянного тока высокого напряжения генерирование и распределение энергии производится при помощи переменного тока. Постоянный ток высокого напряжения применяется непосредственно только в линии передачи, в начале которой сооружается преобразовательная подстанция для преобразования трехфазного тока в постоянный (выпрямительная подстанция) и в конце линии – преобразовательная подстанция для преобразования постоянного тока в трехфазный переменный ток (инверторная подстанция). Преобразование тока производится на высоком напряжении. Для реверсивности передачи и для удобства эксплуатации каждая из преобразовательных подстанций должна допускать оба режима работы и выпрямление, и инвертирование”.

Вопрос второй. Почему разрабатывались преобразователи компенсационного типа? В том же отчете за 1951-1952 г.г. отмечается:

“Существующие схемы преобразования допускают работу только с отстающим углом сдвига, в результате чего преобразовательные установки являются потребителями значительной реактивной мощности, что, в свою очередь, сильно затрудняет использование новых качеств вентилях. Недостаток существующих схем преобразования особенно остро чувствуется при инвертировании. В питаемой от инверторов сети переменного тока должен быть предусмотрен дополнительный источник реактивной мощности для покрытия нужд не только самого инвертора, а и нужд потребителей, получающих активную мощность от инверторов. Например, при мощности передачи постоянного тока 1000000 кВт в питаемой сети необходим дополнительный источник реактивной мощности порядка 1500000 квар. Этот пример показывает насколько остро чувствуется вопрос компенсации реактивной мощности в новых передачах постоянного тока. Этот вопрос может полностью отпасть, если перейти к новым схемам преобразования, так называемым схемам преобразования с опережающим углом сдвига. Схемы преобразования с опережающим углом сдвига допускают работу не только с отстающим углом сдвига, а и с опережающим углом сдвига, в частности и с углом сдвига равным нулю. В результате преобразовательные

установки могут либо не потреблять вовсе реактивной мощности, либо даже стать ее источниками.”

Изложенное показывает, что компенсационные преобразователи предназначены для компенсации значительных объемов реактивной мощности.

Вопрос третий. Кто лидер и кто конкуренты? Снова обратимся к отчету за 1951-1952 г.г., где отмечается:

“До настоящего времени схемы преобразования с опережающим углом сдвига мало изучены и практически нигде не применяются.

Первые схемы с опережающим углом сдвига были предложены и разработаны советскими учеными Г.И. Бабатом и И.Л. Кагановым. Эти схемы исследовались в ЭНИИНе АН СССР, ВЭИ, МЭИ и НИИПТе. Изучавшиеся схемы оказались мало пригодными для целей высоковольтного преобразования, что затормозило внедрение новых схем в промышленность.

В Киевском политехническом институте разработаны новые принципы построения схемы преобразования с опережающим углом сдвига. Предложен ряд новых схем, в частности некоторые из них перспективны для передач постоянного тока высокого напряжения”.

В данном случае можно говорить о весьма амбициозном заявлении молодого кандидата технических наук, которое впоследствии превратилось в научную основу оригинального направления в силовой электронике. Причем надо обратить внимание, с какими организациями соревновался молодой ученый Чиженко И.М. и коллектив кафедры, на которой он работал. Хотя может быть именно наличие сильной конкуренции и обеспечило такой блестящий результат.

Вопрос четвертый. Почему преобразователи, построенные по схемам с опережающим углом сдвига, не нашли применения в передачах постоянного тока?

Если говорить об исследованиях других авторов, то их оценка имеется в работах Ивана Мироновича. Он писал, что для превращения преобразовательной установки из потребителя реактивной мощности в ее генератор, необходимо изменить знак угла регулирования. В обычных преобразователях это невозможно, т.к. при отрицательных углах сдвига не обеспечиваются условия коммутации.

Для того, чтобы получить отрицательный угол сдвига, необходимо осуществить коммутацию тока с предыдущей фазы на очередную в условиях, когда ЭДС очередной фазы меньше ЭДС предыдущей фазы. Поэтому для обеспечения возможности получения отрицательного или иначе, опережающего угла сдвига необходимы специальные схемы преобразования.

Такие схемы с опережающим углом сдвига можно строить, применяя один из следующих способов:

1. В схеме применяются дополнительные вентили, питание анодов которых обеспечивается специальным источником энергии. Схемы, построенные по этому способу называют схемами с промежуточной коммутацией (или схемами с двухступенчатой искусственной коммутацией).

Для работы преобразователя, построенного по такой схеме, требуется, чтобы первичная обмотка силового трансформатора была соединена в треугольник, а не

в звезду, ибо при соединении в звезду коммутация тока с предыдущего анода на вспомогательный анод или со вспомогательного анода на очередной становится невозможной.

В случае необходимости соединения первичной обмотки в звезду, следует применить трехобмоточный трансформатор, соединив третью обмотку в треугольник.

2. В нужный момент времени, когда ЭДС очередной фазы меньше ЭДС предыдущей фазы, в контур коммутации вводится дополнительная ЭДС такой величины, чтобы обеспечить условие коммутации.

Схемы, построенные по этому способу, получили название схем с непосредственной коммутацией (или схем с одноступенчатой искусственной коммутацией).

Из всех схем преобразования с опережающим углом сдвига с промежуточной коммутацией наиболее совершенной оказалась схема И.Л. Каганова.

Тщательное исследование этой схемы показало, что она эффективна только при соблюдении следующих условий: анодный реактанс схемы мал порядка 3-5%; малым должен быть и угол дейонизации вентилях, как основных, так и дополнительных, порядка до 5^0 . Если анодный реактанс и угол дейонизации превышают указанные величины, то напряжения на конденсаторах получаются чрезмерно большими, в результате напряжения на всех элементах схемы в том числе и обратные напряжения на вентилях получаются неприемлемыми, как по величине, так и по форме кривой. Эти перенапряжения можно частично было бы снизить, увеличивая величину емкости схемы. Однако, последнее мероприятие наталкивается на противоречие: увеличение емкости требует увеличения времени, потребного для перезарядки конденсатора. В схемах же с промежуточной коммутацией это приводит к резкому увеличению времени работы вспомогательных анодов и сокращению времени работы основных анодов, а следовательно к резкому снижению эффективности схемы.

Сравнивая схемы с непосредственной и промежуточной коммутацией, можно отметить недостатки последних:

1. Главное оборудование – анодный трансформатор и вентили используются не полно, так как при работе дополнительного анода энергия из цепи переменного тока в цепь постоянного тока не поступает, преобразовательная установка в этот период времени работает вхолостую.

2. Для выполнения схемы требуется большее количество вентилях, более дорогой анодный трансформатор, относительно сложная система управления.

3. Сокращение времени работы основных анодов приводит к увеличению процентного содержания высших гармонических в кривой анодного тока, в результате чего ухудшается общий коэффициент мощности за счет увеличения коэффициента искажения.

Схемы с непосредственной коммутацией указанными для схем с промежуточной коммутацией недостатками не обладают, и в этом отношении они являются более совершенными. Однако и они практического применения в передачах постоянного тока не нашли. Почему? В работах Ивана Мироновича

ответ на этот вопрос найти не удалось. Можно предположить, что на период актуальности проблемы не удалось предложить простую и эффективную компенсационную схему преобразования, которая бы базировалась на трехфазной мостовой схеме. А именно эта схема преобразования была заложена во всех построенных и проектируемых преобразовательных подстанциях передач постоянного тока.

Однако научные исследования, направленные на разработку компенсационного преобразователя для передач постоянного тока, даром не пропали. Они дали толчок в разработке серии схем преобразователей, перспективных для электротехнологии и транспорта.

Вопрос пятый. В чем сущность компенсационных преобразователей, нашедших широкое практическое применение в народном хозяйстве?

Работа всех современных мощных преобразовательных установок базируется на трехфазной системе напряжений и основу их схемной реализации составляет элементарная трехфазная схема, состоящая из трехфазного силового трансформатора и трехфазной вентильной группы. Повышение энергетических характеристик элементарного преобразователя может быть достигнуто за счет комплектации его внешним компенсирующим устройством (батареей конденсаторов, ТКРМ и т.д.), или посредством перевода его в компенсационный режим работы.

Перевод в компенсационный режим можно осуществить за счет введения в контур коммутации дополнительной ЭДС, роль которой играет напряжение коммутирующих конденсаторов, перезаряжаемых составляющими токов нагрузки. Таким образом, в компенсационном преобразователе должно быть коммутирующее звено, которое и обеспечивает компенсационный режим работы устройства.

Коммутирующее звено мощного преобразователя содержит трехфазную батарею конденсаторов, соединенную в звезду или в треугольник, и какое-либо устройство (коммутатор), обеспечивающее ее перезаряд составляющими токов нагрузки. Коммутатор может быть пассивным, полуактивным или активным.

Пассивным является коммутатор, выполняющий функции распределения тока по фазам конденсаторной батареи без изменения величины ее емкости. Пассивный коммутатор не оказывает прямого регулирующего воздействия на режим преобразования электрического тока. Классическим представителем такого устройства является трехфазный уравнивающий реактор.

Полуактивный коммутатор кроме функций распределения тока по фазам конденсаторной батареи с целью ее перезаряда, имеет возможность влиять на режим работы преобразователя за счет изменения емкости батареи конденсаторов и (или) дополнительного регулирования процесса перезаряда. Очевидно, что здесь имеются различные варианты технической реализации.

Активный коммутатор, выполняя функции распределения тока и перезаряда конденсаторной батареи, принимает участие в преобразовании электрического тока. Поэтому он является вентильно-трансформаторным устройством.

Таким образом, в отличие от обычных преобразователей компенсационные позволяют осуществлять преобразование электрического тока при одновременном генерировании реактивной мощности.

Вопрос шестой. За какие достижения коллективу, несомненным лидером которого был Чиженко И.М., присуждена Ленинская премия в области науки и техники?

Представляется, что лучше всего ответить на этот вопрос материалами представления в Комитет по Ленинским премиям в области науки и техники при Совете Министров СССР работы “Разработка, исследование и внедрение компенсационных ртутно-выпрямительных агрегатов”.

В выписке из протокола заседания Ученого Совета электротехнического факультета Киевского ордена Ленина политехнического института № 8 от 29 сентября 1961 года отмечается.

“В настоящее время находятся в эксплуатации и устойчиво работают параллельно с обычными агрегатами на наивысшем электролизном напряжении десять мощных компенсационных преобразователей общей мощностью порядка 80000 кВА: один на тяговой подстанции Пост-Волынский Юго-Западной жел. дороге мощностью 1800 кВА; один на Днепровском, один на Богословском, один на Уральском, один на Сумгайтском и три на Кандалакшском алюминиевых заводах мощностью по 10000 кВА каждый; один на Киевском и один на Кирово-Чепецком химических заводах мощностью по 4200 кВА каждый. Монтируется и проектируется еще ряд компенсационных агрегатов. Внедренные в промышленности компенсационные агрегаты смонтированы по схеме “звезда или треугольник – прямая и обратная звезды с уравнительными катушками и коммутирующими конденсаторами”.

Отличительной особенностью компенсационных агрегатов по сравнению с обычными является наличие в них дополнительного коммутирующего звена, состоящего из трехфазной уравнительной катушки и конденсаторов. Наличие в схеме этого звена позволяет осуществлять коммутацию тока в вентилях в любой момент времени. Коммутация тока осуществляется здесь не напряжениями сети переменного тока, а напряжениями конденсаторов, возникающих вследствие протекания в них тока нагрузки.

Новыми качественными особенностями компенсационных преобразователей является следующее:

1. Компенсационные преобразователи являются как бы умножителями емкости конденсаторов. Поэтому они допускают более эффективное их использование для генерирования реактивной мощности.

2. Конденсаторы в преобразователях отделены от сети переменного тока вентилями, поэтому возникновение резонансных явлений обусловленных ими в сетях переменного тока исключаются.

3. Наличие конденсаторов в схеме преобразователя создает возможность нового емкостного способа регулирования режимов его работы, так как изменением емкости коммутирующих конденсаторов можно управлять наклоном внешней характеристики преобразователя. Существенно, что такое регулирование

возможно и при применении неуправляемых вентилях, причем оно позволяет изменять нагрузку агрегата в широких пределах при неизменном коэффициенте мощности. Поэтому в ряде случаев надобность в применении регулировочных автотрансформаторов отпадает.

4. При работе компенсационного преобразователя с коэффициентом мощности близким к единице, компенсация реактивной мощности обеспечивается не на шинах подстанции, а непосредственно в месте ее потребления – в самом агрегате, поэтому такая компенсация обеспечивает уменьшение потерь энергии и в агрегате.

5. При сравнительно глубоком регулировании коммутирующее звено в значительной мере сглаживает пульсации выпрямленного напряжения. Трехфазная уравнивательная катушка является местом дополнительных потерь энергии в агрегате, однако, следует иметь в виду, что она выполняет частично роль катодной индуктивности и сглаживает пульсации выпрямленного напряжения.

Аварийный ток обратного зажигания нарастает медленно, неоднократно проходя через нулевые значения, в результате чего создаются условия для самоликвидации обратных зажигания и облегчается работа защитной аппаратуры. Кроме того, уменьшение аварийных токов облегчает работу основного оборудования агрегата (вентилей и трансформаторов).

Длительная эксплуатация и теоретически-экспериментальные исследования внедренных в промышленности компенсационных преобразователей показали устойчивую их работу с большим технико-экономическим эффектом.

Работа только одного компенсационного преобразователя на Днепровском алюминиевом заводе позволила повысить коэффициент мощности серии, состоящей из шести параллельно работающих ртутных преобразователей с 0,860 до 0,906.

Работа одного компенсационного РВ агрегата сопровождается ежегодной экономией электроэнергии за счет уменьшения потерь в питающей сети и оборудовании преобразовательной подстанции порядка 4 млн. кВт-часов, при окупаемости дополнительных затрат на его создание за половину года.

При использовании емкостного способа регулирования режимов работы преобразователя его эффективность намного повышается и создается возможность исключения дорогого и динамически неустойчивого в работе регулировочного автотрансформатора.

Использование емкостного способа регулирования является особенно перспективным для применения на преобразователях новых мощных алюминиевых заводов, не имеющих регулировочных автотрансформаторов, а также создаваемых для электроемких предприятий мощных полупроводниковых преобразовательных агрегатах.

Эксплуатация опытных компенсационных преобразователей в различных отраслях промышленности и оценка полученных результатов этой работы дала возможность институту рекомендовать широкое внедрение их в народном хозяйстве.

Большую роль для внедрения выполненных работ сыграло вынесенное в 1955 году решение Междуведомственного экспертно-технического Совета при Государственной инспекции по промышленной энергетике и энергонадзору МЭС СССР и совместное с Союзглавэнерго при Госплане СССР решение Государственного Комитета Совета Министров СССР по автоматизации и машиностроению № АТ-65/6938 от 5 октября 1960 г. “О внедрении устройств, повышающих коэффициент мощности электроемких производств”, а также изготовление заводом “Уралэлектроаппарат” в соответствии с указанным постановлением специального оборудования для компенсационных РВ агрегатов (трехфазных уравнильных реакторов, ртутных выпрямителей с усиленной изоляцией вакуумной системы и специальных шкафов управления выпрямителем).

Технико-экономические показатели компенсационных преобразователей изучались специально выделенными комиссиями.

В ходе выполнения и внедрения работы ее результаты неоднократно обсуждались на Ученых Советах института, ведомственных технических совещаниях и Всесоюзных научно-теоретических конференциях.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований по данной работе в процессе их выполнения публиковались в периодической научно-технической литературе, что дало возможность ознакомиться с ними широкому кругу научных и инженерно-технических работников. Большое значение в этом имела дискуссия развернутая по данной работе на страницах журнала “Промышленная энергетика”.

Одновременно с публикацией результатов работ, институтом по запросам промышленных предприятий и ведущих проектных организаций выполнялись расчеты компенсационных преобразователей и разрабатывались задания на их проектирование и монтаж с передачей их для внедрения.

Аналогичные материалы изготовлены и переданы для внедрения также Китайской, Чехословацкой, Румынской и Венгерской народным республикам по их запросам.

Работы института по данной теме выполнялись в тесном содружестве с работниками промышленности и проектных организаций при их непосредственном участии.

В 1960 году учеными советами института и электротехнического факультета одновременно с Советом народного хозяйства Запорожского экономического административного района данная работа представлялась на соискание Ленинской премии 1961 года, но Комитетом по Ленинским премиям в области науки и техники при Совете Министров Союза ССР была отложена рассмотрением до дополнительного внедрения.

В 1961 году работа получила дальнейшее развитие и завершена широким внедрением на ряде крупнейших электрометаллургических и электрохимических заводов страны, а также опубликованием обстоятельных материалов в научно-технической печати”.

В итоге было сооружено и введено в эксплуатацию в промышленности и в электрифицированном транспорте 46 мощных компенсационных преобразователей общей мощностью 365 МВА, обеспечивающих ежегодную экономию электроэнергии свыше 145 млн. кВт*час.

Вопрос седьмой. Так кто же был основателем нового направления в энергетической электронике?

Он возник у меня, когда работа над текстом доклада была закончена. Насколько точным является его название.

Представляется, что точной будет следующая позиция: основателем нового направления в энергетической электронике был кандидат технических наук Чиженко Иван Миронович, а звание академика – это следствие выдающихся научных достижений.

Как бы там ни было, я сам и мои коллеги должны быть благодарны судьбе за возможность совместной работы и плодотворного общения с Учителем, которым был для нас Иван Миронович.