

## Комплект преобразователей напряжения для установок кондиционирования воздуха в отечественных пассажирских вагонах

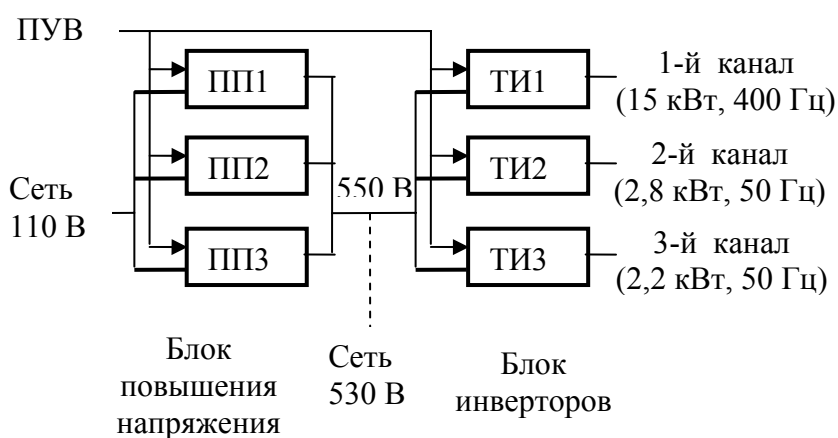
Кузькин В.И., Мелешкин В.Н., Мясищев С.В., Ульянов Е.К.

Всероссийский электротехнический институт (ВЭИ) им. В.И.Ленина

В 1994 году в России начались работы по созданию первого отечественного комплекса жизнеобеспечения пассажирского вагона (модель 61-4179) с системой кондиционирования воздуха. Научно-инженерный центр (НИЦ) "ЭЛСИЭЛ" ВЭИ принял участие в этих работах, взяв на себя разработку и освоение серийного производства частотно-регулируемого преобразователя для питания установки кондиционирования воздуха (УКВ). В мае 1996 года в Твери состоялось заседание МВК по комплексу жизнеобеспечения вагона, где преобразователь для кондиционера (сокращённо ПТК) был представлен опытным образцом и сопутствующей технической документацией.

Последующая модернизация ПТК связана с переходом на более совершенные силовые ключи (типа IGBT) и с размещением его в подвагонных унифицированных модулях (ПУМ). Летом 1997 года был изготовлен и испытан первый опытный образец ПТК-2, а зимой и летом 1997 – 1998 годов вагон, оборудованный комплексом жизнеобеспечения (включая ПТК-2), прошёл так называемые пробегные испытания по различным регионам России. В 1999 году совместными усилиями НИЦ "ЭЛСИЭЛ" и НПП "ЭКСПРЕСС" (г. Тверь) освоено серийное производство ПТК-2: эти изделия установлены на 30 пассажирских вагонах тверского вагоностроительного завода (ТВЗ) и находятся в эксплуатации на южном и восточном направлениях железных дорог Российской Федерации. В 2000 году изготовлено и поставлено в Тверь ещё около 200 комплектов ПТК-2.

Структурная схема ПТК изображена на рис. 1. Как видно, он представляет собой комплекс полупроводниковых преобразователей, состоящий из двух функциональных блоков: один из них (блок повышения напряжения) превращает постоянное напряжение 110 В в стабилизированное постоянное напряжение 550 В, а другой (блок инверторов) преобразует это напряжение в три системы трёхфазных напряжений 380 В. Таким образом реализуется три канала для питания приводных асинхронных двигателей УКВ



– турбокомпрессора (15 кВт, 400 Гц), вентилятора конденсатора (2,8 кВт, 50 Гц) и приточно-го вентилятора (2,2 кВт, 50 Гц). При этом управление ПТК и регулирование режимов его работы осуществляется автоматически или вручную (проводником вагона) – посредством пульта управления вагона (ПУВ).

Рис. 1. Структурная схема ПТК.

Упомянутое входное напряжение 110 В обеспечивает система электроснабжения вагона, в состав которой входят трёхфазный генератор (с приводом от колёсной пары),

мостовой трёхфазный выпрямитель и буферная аккумуляторная батарея. Для питания блока инверторов может быть также использовано и повышенное постоянное напряжение 520...540 В, получаемое, например, от высоковольтного преобразователя (при централизованном электропитании вагона) или от промышленной трёхфазной сети (через выпрямитель – на стоянке).

Блок повышения постоянного напряжения реализован на трёх одноктактных обратных преобразователях ПП1...ПП3, соединённых параллельно по входу и по выходу. Электрическая схема одного такого преобразователя изображена на рис. 2.

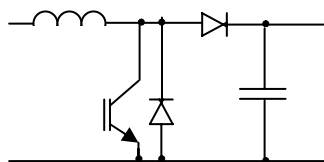


Рис. 2. Электрическая схема одноктактного обратного преобразователя.

Как видно, он содержит накопительный дроссель, транзистор и два диода, а так же выходной конденсатор. При включении транзистора энергия от источника поступает в дроссель, а после его отключения через диод передаётся конденсатору. Отметим также, что транзистор и диод конструктивно выполнены в одном модуле типа SKM 200 GAL 123 D (фирма SEMIKRON), корпус которого изолирован от его силовых (и управляющих) выводов.

Управление преобразователями ПП1...ПП3 осуществляется от одной системы управления, выполненной на базе микропроцессора типа TP87C51 (фирма Intel). При этом управляющие сигналы поступают на затворы транзисторов через так называемые драйверы, предназначенные для усиления и согласования уровней напряжения, гальванической развязки, защиты транзисторов от коротких замыканий и пр. Заметим, что в первых партиях ПТК повышающие преобразователи были укомплектованы драйверами типа SKHI 10 (фирма SEMIKRON), а в последующем на замену им в НИЦ «ЭЛСИЭЛ» разработаны и освоены в производстве аналогичные драйверы ДТИ-1 /12.

Алгоритм управления силовыми ключами в повышающих преобразователях таков, что частота коммутации каждого из них неизменна и равна 5 кГц, но управляющие сигналы сдвинуты во времени один относительно другого на одну треть периода, что обеспечивает существенное уменьшение пульсаций входного и выходного токов относительно их средних значений. Ширина управляющих импульсов зависит от сигнала обратной связи по выходному напряжению, реализуемого датчиком напряжения типа LV 25-P (фирма LEM) причём включение силового транзистора осуществляется при нулевом токе, а выключение – при ограничении максимально допустимого уровня тока в дросселях, контролируемом посредством датчиков тока типа LT 300-S/SP2 (фирма ТвЕЛЕМ) .

Иллюстрацией изложенного могут служить временные диаграммы тока в накопительных дросселях ПП1...ПП3, приведенные на рис. 3 (осциллограммы получены с использованием цифрового осциллографа типа TDS 420А фирмы Tektronix).

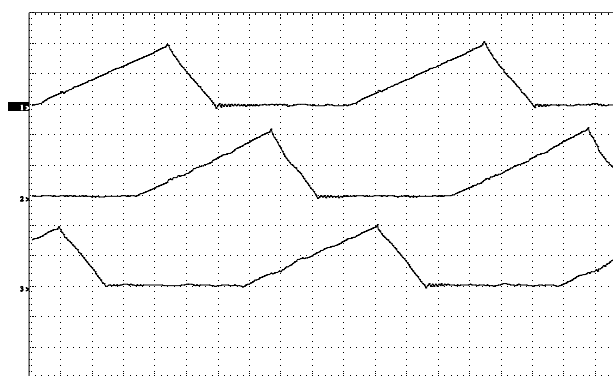


Рис. 3. Временные диаграммы тока в дросселях ПП1...ПП3 (масштабы: 100 А/кл. и 20 мкс/кл.).

Как видно, для рассматриваемого режима работы повышающих преобразователей характерны три временных интервала, составляющих в совокупности период (200 мкс) коммутации силовых ключей. На первом из этих интервалов (продолжительностью 80 мкс) энергия запасается в дросселе, при этом ток возрастает от 0 до 200 А, на втором интервале (30 мкс) она передаётся выходному конденсатору, а ток уменьшается до нуля, третий же интервал (30 мкс) соответствует бестоковой паузе. В результате среднее за период коммутации значение тока в дросселе оказывается равным 55 А, а постоянная составляющая входного тока – 165 А, что при входном напряжении 140 В соответствует мощности порядка 23 кВт.

Трёхфазные инверторы ТИ1...ТИ3 (см. рис.1) всех трёх каналов ПТК выполнены единообразно в виде мостового инвертора напряжения. Инвертор 1-го канала (ТИ1), электрическая схема которого приведена на рис. 4, содержит три силовых IGBT-модуля (a, b и c) полумостового типа (SKM 150 GB 123 D) с трёхфазным LC-фильтром на выходе.

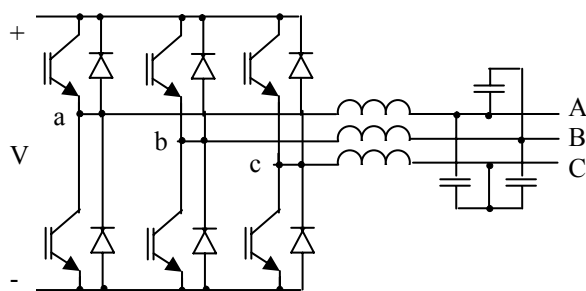


Рис. 4. Электрическая схема трёхфазного инвертора 1-го канала.

аналогичными драйверами ДТИ-2/12 (разработка НИЦ «ЭЛСИЭЛ»). Система управления формирует управляющие ШИМ-сигналы на частоте порядка 10 кГц, реализуя один из так называемых экономичных алгоритмов (максимальная амплитуда основной гармоники линейного напряжения на выходе инвертора соответствует его входному напряжению). Кроме того, система управления инвертором ТИ1 осуществляет все необходимые функции режимной автоматики, защиты и сигнализации, представляя собой функционально законченный узел.

Для ограничения выходной мощности этого инвертора используется обратная связь по входному току, а контроль токов на выходе инвертора осуществляется посредством линейных датчиков тока типа LT 100-P/SP42. В качестве примера на рис. 5 приведены временные диаграммы линейного напряжения ( $u_{AB}$  – сверху) и тока ( $i_B$  – внизу) на выходе ТИ1 (после LC-фильтра). Как видно, осциллограммы получены на частоте 309 Гц, при этом амплитуда линейного напряжения равна 400 В, что подтверждает избранную пропорциональную зависимость между выходными частотой и амплитудой напряжения (частота регулируется в диапазоне 1 : 50).

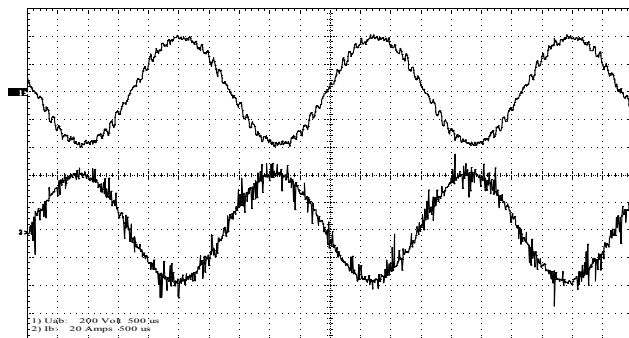


Рис. 5. Временные диаграммы линейного напряжения ( $u_{AB}$ ) и линейного тока ( $i_B$ ) на выходе ТИ1 (масштабы: 200 В/кл., 20 А/кл. и 500 мкс/кл.).

Этот фильтр обеспечивает сглаживание коммутационных пульсаций выходного напряжения инвертора на уровне, приемлемом для высокооборотного (24000 об/мин) турбокомпрессора.

Коммутация силовых ключей в инверторе ТИ1 обеспечивается системой управления, выполненной на базе микропроцессора типа ADMC331 (фирма ANALOG DEVICES), в сочетании с драйверами типа SKHI 23, заменёнными в последующих партиях ПТК

аналогичными драйверами ДТИ-2/12 (разработка НИЦ «ЭЛСИЭЛ»). Система управления формирует управляющие ШИМ-сигналы на частоте порядка 10 кГц, реализуя один из так называемых экономичных алгоритмов (максимальная амплитуда основной гармоники линейного напряжения на выходе инвертора соответствует его входному напряжению). Кроме того, система управления инвертором ТИ1 осуществляет все необходимые функции режимной автоматики, защиты и сигнализации, представляя собой функционально законченный узел.

Для ограничения выходной мощности этого инвертора используется обратная связь по входному току, а контроль токов на выходе инвертора осуществляется посредством линейных датчиков тока типа LT 100-P/SP42. В качестве примера на рис. 5 приведены временные диаграммы линейного напряжения ( $u_{AB}$  – сверху) и тока ( $i_B$  – внизу) на выходе ТИ1 (после LC-фильтра). Как видно, осциллограммы получены на частоте 309 Гц, при этом амплитуда линейного напряжения равна 400 В, что подтверждает избранную пропорциональную зависимость между выходными частотой и амплитудой напряжения (частота регулируется в диапазоне 1 : 50).

Привлекает внимание и тот факт, что изображённые на рис. 5 кривые напряжения и тока находятся практически в противофазе. Это означает, что в статорных обмотках турбокомпрессора фазовый сдвиг

между напряжением и током равен примерно  $\pi/6$ , то есть его коэффициент мощности в этом режиме принимает вполне ожидаемое значение 0,87. Учтём наконец, что амплитуда линейного тока – судя по осциллограмме – равна 40 А и, следовательно, выходная мощность ТИ1 составляет около 12 кВт.

Изображённые на рис. 5 осциллограммы качественно подтверждают эффективное подавление высших гармоник напряжения и тока на выходе инвертора ТИ1. Количественной оценкой этого факта может служить частотный спектр линейного напряжения  $u_{AB}$ , приведенный на рис. 6.

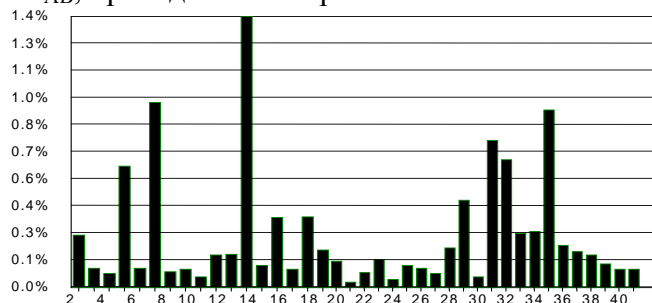


Рис. 6. Частотный спектр линейного напряжения  $u_{AB}$  на выходе ТИ1.

Как видно, наибольшая из высших гармоник (№ 13) составляет 1,4% от основной гармоники (309 Гц), при этом коэффициент гармоник напряжения равен всего лишь 2,53%. Частотный спектр линейного тока  $i_B$  имеет аналогичный характер: наибольшая из высших гармоник (№ 7) составляет 1,7% от основной гармоники, а коэффициент гармоник тока равен 4%.

Трёхфазные инверторы ТИ2 и ТИ3 имеют аналогичную структуру, но выполнены на шестиключевых IGBT-модулях мостового типа (SKM 40 GD 124D) и с использованием соответствующих драйверов типа SKHI 60, которые в последующем заменены аналогичными драйверами ДТИ-6/12, и токовых датчиков типа LA 25-NP. Ещё одна особенность рассматриваемых инверторов состоит в том, что они не содержат выходных LC-фильтров, так как вентиляторные двигатели промышленной частоты менее критичны – в сравнении с высокооборотным турбокомпрессором – к спектральному составу выходного ШИМ-напряжения.

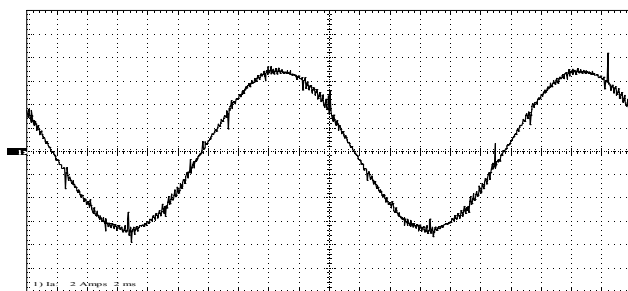


Рис. 7. Временная диаграмма линейного тока на выходе ТИ2 (масштабы: 2 А/кл. и 2 мс/кл.)

Подтверждением этому может служить временная диаграмма одного из линейных токов на выходе ТИ2, приведенная на рис. 7. Как видно, осциллограмма получена на частоте 50 Гц, при этом ток имеет практически синусоидальную форму, а его амплитуда равна примерно 7 А. Количественной характеристикой синусоидальности тока служат следующие два показателя: наибольшая из высших гармоник (№ 12) составляет всего лишь 0,8% от основной гармоники, а коэффициент гармоник тока равен 2%. Для оценки выходной мощности ТИ2 принимаем коэффициент мощности двигателя равным 0,9, а амплитуду линейного напряжения – 520 В, в итоге получаем 2,7 кВт.

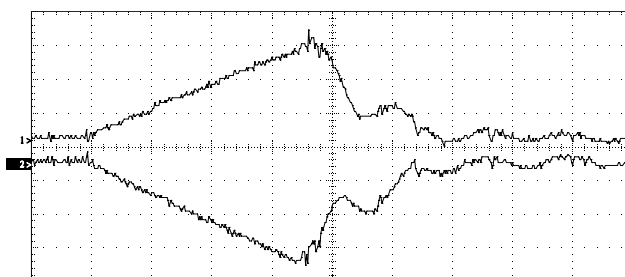


Рис. 8. Временная диаграмма линейных токов при коротком замыкании на выходе ТИ2 (масштабы: 25 А/кл., 1 мкс/кл.)

В трёхфазных инверторах всех трёх каналов реализована двойная защита от опасных последствий внутренних и внешних коротких замыканий, для чего – наряду с токовыми датчика-

ми – используются и защитные свойства упомянутых драйверов. Эффективность такой защиты подтверждается временной диаграммой линейных токов при коротком замыкании между фазами А и В на выходе инвертора ТИ2, приведенной на рис. 8. Как видно, линейные токи за 3,5 мкс увеличиваются до 75 А, после чего происходит отключение силовых модулей инвертора.

Конструктивно ПТК выполнен в двух ПУМ (высота 600 мм, длина 1042 мм и глубина 1146 мм), каждый из которых посредством направляющих устанавливается в соответствующем каркасе, закреплённом на раме вагона и закрытом спереди обтекателем. Фотография комплекта из двух ПУМ (модуль инверторов – слева и модуль повышения напряжения – справа) приведена на рис. 9.



Рис. 9. Внешний вид двух ПУМ (модуль инверторов и модуль повышения напряжения).

Как видно, конструкция ПУМ предусматривает принудительный внешний обдув теплоотводящих элементов (оребрённые радиаторы на стенках модуля), который осуществляется под контролем систем управления – с использованием цифровых термодатчиков типа DS 1820 (фирма DALLAS SEMICONDUCTOR), установленных на радиаторах.

На верхних стенках подвагонных модулей установлены поворачивающиеся крышки, обеспечивающие односторон-

нее обслуживание ПТК, в частности, свободный доступ к его элементам и возможность замены неисправных узлов без демонтажа исправных элементов и узлов.

Силовые транзисторы размещены в ПУМ на упомянутых радиаторах. Дроссели повышающих преобразователей установлены в центральной части модуля, а накопительные конденсаторы рассредоточены по шинам высокого постоянного напряжения как на выходе повышающего преобразователя, так и на входах трёхфазных инверторов.

Равномерный тепловой режим в ПУМ обеспечивается встроенными вентиляторами, которые получают питание с выхода 2-го канала. Подогрев элементов в модулях ПТК при пониженных температурах окружающей среды (до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) осуществляется автоматически посредством нагревателей, подключённых к входным шинам ПТК через силовой ключ.

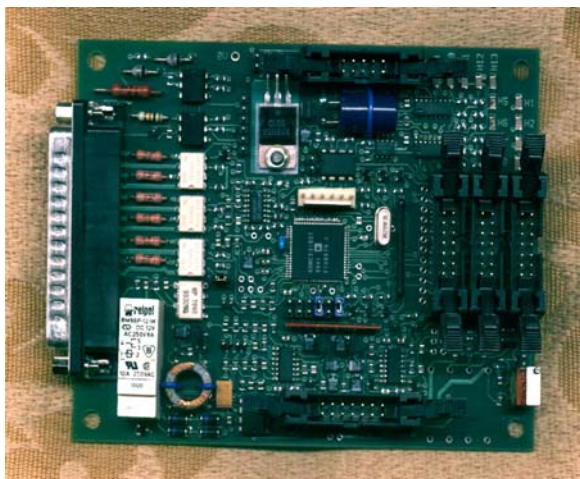


Рис. 10. Вид на печатную плату системы управления 3-го канала.

Системы управления, защиты и сигнализации преобразователей в составе ПТК смонтированы на отдельных печатных платах, размещённых в непосредственной близости от драйверов силовых модулей. Фотография одной из них приведена на рис. 10.

Все платы управления снабжены разъемами и приспособлены для быстрой замены на исправные в случае отказов. Их конструкция обеспечивает возможность быстро определять место отказа с помощью встроенных средств диагностики и устранять его

причину в стационарных условиях. В составе ПТК имеются также блоки защиты, обеспечивающие аварийное отключение входного автоматического выключателя на ПУВ.

Все каналы ПТК одновременно обеспечивают общий закон управления производительностью УКВ, осуществляя плавные пуск, регулирование и остановку его двигателей. Для ограничения пусковых токов и регулирования скорости вращения двигателей применяется взаимосвязанное изменение частоты и напряжения на всех выходах ПТК.

Чтобы продемонстрировать простоту управления комплексом ПТК-УКВ, рассмотрим кратко действия проводника вагона при ручном управлении. Предварительно он выбирает на ПУВ режим работы (кондиционирование) и вид управления (ручное), а затем включает вентиляцию вагона. При этом двигатель 3-го канала плавно разгоняется до номинальной частоты вращения, а через 20 сек. по окончании разгона на световом табло ПУВ высвечивается соответствующая индикация (“Вентиляторы вагона”).

Затем проводник устанавливает переключатель “Холодильная установка” в положение 1, после чего двигатель 2-го канала плавно разгоняется до номинальной частоты вращения. Через 20 секунд по окончании разгона этого двигателя автоматически включается 1-й канал ПТК и турбокомпрессор в течение 100 секунд плавно разгоняется до частоты вращения 200 Гц, а на световом табло ПУВ высвечивается индикация “Холодильная установка”. Регулирование производительности турбокомпрессора (изменением выходной частоты инвертора ТИ1 в пределах от 200 до 400 Гц) осуществляется специальным переключателем, а нормальная работа ПТК в целом подтверждается индикатором “Преобразователь кондиционера” на световом табло ПУВ.

Для остановки турбокомпрессора переключатель “Холодильная установка” необходимо перевести в исходное состояние. При этом двигатели 1-го и 2-го каналов последовательно (и плавно) затормаживаются до полной остановки, а на ПУВ исчезает соответствующая световая индикация.

Опыт эксплуатации вагонов с кондиционированием воздуха в течение первых семи месяцев 2000 года показал, что в так называемый период приработки на долю ПТК приходилось по разным оценкам от 5 до 15% от общего количества отказов комплектующего оборудования вагонов. Проведенный анализ позволил выявить следующие причины отказов ПТК: скрытые дефекты комплектующих изделий (67% отказов), недоработки схемотехнического (13%) и технологического (15%) характера, а также нарушение условий эксплуатации (5%).

В перечне некачественных комплектующих элементов оказались, например, отдельные диоды, конденсаторы и резисторы. Схемотехнические ошибки проявились, в частности, случайными функциональными сбоями, обусловленными воздействием электромагнитных помех. Нарушения технологии производства сопровождалось, к примеру, пробоем изоляции между обмотками маломощных трансформаторов или возникновением электрической дуги между контактами силовых разъёмов. Курьёзом на этом фоне выглядит факт эксплуатации ПУМ с неплотно закрытыми крышками.

Обобщение опыта эксплуатации ПТК привело к смене отдельных поставщиков комплектующих изделий и усилению контроля – входного и пооперационного – на стадии производства, а также к ужесточению режимов испытаний готовых узлов и ПТК в целом.

Устранение неисправностей в ПТК, выявляющихся в процессе эксплуатации, осуществляется в сервисных (г. Москва и г. Адлер) и ремонтном (г. Тверь) центрах. При этом отказавшие функциональные блоки и блоки управления определяются соответственно с помощью встроенных средств индикации и диагностики, а неисправные силовые узлы или отдельные элементы – по характерным признакам, свойственным их электрическому, механическому или тепловому разрушению. Почти годовой опыт ре-

монта отказавших изделий свидетельствует о том, что среднее время восстановления работоспособного состояния ПТК не превышает 1 часа.

#### Выводы

1. Разработан комплект частотно-регулируемых преобразователей для питания установок кондиционирования воздуха в отечественных пассажирских вагонах.

2. Освоен серийный выпуск этих комплектов преобразователей и осуществляется регулярная поставка их на вагоностроительный завод (г. Тверь).

3. Накоплен опыт успешной эксплуатации отечественных пассажирских вагонов с кондиционированием воздуха (на южном и восточном направлениях железных дорог РФ).

4. Изложенное позволяет заключить о целесообразности дальнейшего совершенствования выпускаемых преобразователей и расширения сфер их применения.

В частности, на очередном заседании МВК, которое состоялось в Твери в ноябре 2000 года, НИЦ «ЭЛСИЭЛ» представил модернизированные опытные образцы ПТК-2М (в подвагонном и внутривагонном исполнении), которые обеспечивают питание как установок кондиционирования воздуха, так и бытовых электроприборов в вагонах. Подобные преобразователи могут найти применение не только на новых пассажирских вагонах, но и на вагонах электропоездов. Ими также могут быть оснащены эксплуатируемые пассажирские вагоны (в ходе их капитального ремонта).