

# Современные тиристорные преобразователи частоты типа «Параллель»

## для установок индукционного нагрева металлов

**Юрий Зинин**

umz42@mail.ru

**Михаил Мультенко**

mulmenko@prl.ru

В статье показаны основные отличия современных тиристорных преобразователей повышенной частоты (ППЧ) типа «Параллель» от аналогов 10–20-летней давности, различной мощности и частоты, предназначенных для промышленных установок индукционного нагрева металлов токами высокой частоты (ТВЧ).

Приведено описание одного из вариантов конструкции и основных функций специализированных ячеек блока управления и контроля (БУК) тиристорных ППЧ пятого поколения. Изложена работа основного узла ППЧ — блока силового полупроводникового (БСП). Показано, что современные тиристорные преобразователи частоты позволяют осуществить эффективную замену устаревших ППЧ и техническую модернизацию технологических процессов установок нагрева ТВЧ.

*То, что один человек сделал,  
другой всегда сможет.  
(Из кинофильма «Формула Любви»)*

### Введение

Некоторые промышленные технологии применяются практически без изменений в течение нескольких десятков лет, например плавка металлов ТВЧ в индукторах промышленных индукционных печей. Изменяются только источники электропитания.

Для электротермических установок индукционного нагрева металлов однофазный ток высокой частоты (ТВЧ) получали преобразованием трехфазного тока промышленной частоты в 50 Гц от машинных или ламповых генераторов. Отечественные машинные генераторы не выдержали конкуренции со статическими преобразователями, поскольку технические параметры тиристорных преобразователей постоянно быстро улучшались.

Основным источником питания индукционных установок, производимых в СССР, были силовые тиристорные преобразователи серии ТПЧ Таллиннского электротехнического завода. Большинство таких тиристорных преобразователей

частоты использовались для питания индукционных печей с горячим либо холодным тиглем как для вакуумного, так и открытого исполнения. Особенности условий эксплуатации индукционных плавильных печей учитывались при проектировании и изготовлении современных ТПЧ пятого поколения с цифровым управлением [1].

Несколько тысяч ТПЧ, выпущенных начиная с 1968 г. компанией ESTEL, применялись именно для питания индукционных плавильных печей. Однако в то время каждое большое предприятие, а также каждое министерство стремились быть независимыми и иметь полную самостоятельность, и потому разрабатывали и производили различное оборудование самостоятельно и для себя.

В 1971 г. был внедрен в промышленную эксплуатацию первый уфимский тиристорный преобразователь для индукционного нагрева металлов. Он был создан совместными усилиями Тульского научно-исследовательского технологического института (ТНИТИ) Министерства машиностроения СССР и Уфимского авиационного института (научный руководитель — С. М. Кацнельсон)

Инициаторами создания уфимской школы полупроводниковых преобразователей частоты стали ректор УАИ Р.Р. Мавлютов и бывший выпускник УАИ И.Г. Съестнов, который был тогда начальником Главного управления Министерства машиностроения СССР. Их совместными усилиями и была создана Отраслевая лаборатория ППЧ министерства машиностроения.

Доцент С. М. Кацнельсон, перешедший в Уфимский авиационный институт из другого вуза, начал вести работу в УАИ с нуля и дождался весомого признания новых разработок тиристорных преобразователей частоты [2].

Полученный статус отраслевой лаборатории ППЧ определил усилия УАИ по развитию научного, конструкторского и технологического потенциала, поэтому вскоре, на основе проделанной работы, было создано СКТБ ППЧ, затем переименованное в НКТБ «Вихрь». В то время впервые заключались хозяйственные договоры с ведущими предприятиями

страны, выполнялись совместные с УАИ научные разработки, началась специализированная подготовка сотрудников, велась большая патентная работа, проводились НТС и организовывались всесоюзные научно-практические конференции, а также выставки. Однако тридцать лет назад в успешно работавшем НКТБ «Вихрь» — начался застой, и вскоре научная школа уфимских преобразователей распалась на несколько отдельных организаций, каждая из которых стала развиваться автономно.

За прошедшие с тех пор десятилетия тиристорные преобразователи частоты типа «Параллель» уфимской научной школы смогли полностью реализовать потенциальные преимущества и успешно конкурировать с источниками питания электротехнологических установок других производителей. Требования к техническим характеристикам ТПЧ постоянно повышаются, поэтому в последних изделиях используются новые компоненты, имеющие, прежде всего, высокую надежность. В настоящее время НПО «Параллель» [3] проектирует и производит тиристорные преобразователи частоты типа «Параллель», соответствующие по техническому уровню Таллинским преобразователям пятого поколения.

Основные технические решения новых тиристорных преобразователей частоты и систем управления были защищены авторскими свидетельствами на изобретения СССР, основные из которых приведены в работах [4–9]. Таким образом, в современных разработках ППЧ используются защищенные технические решения, применяются новые силовые приборы, элементная база и конструктивные решения узлов и компонентов. В последнее время в устройствах силовой электроники используется все больше IGBT — модулей с обратными диодами, которые обеспечивают соответствие массогабаритных показателей и надежности этих устройств современным требованиям [10]. Однако и хорошо зарекомендовавшие себя в процессе длительной эксплуатации тиристорные преобразователи продолжают совершенствоваться.

В то время, когда уфимские тиристорные преобразователи частоты второго-третьего поколений внедрялись в эксплуатацию силами вспомогательных производств больших предприятий, они были просты в эксплуатации, и потому не вызывали затруднений у персонала, обслуживающего электротехнические установки. Производственники оценили преимущества тиристорных преобразователей над эксплуатировавшимися ранее электромашинными или ламповыми преобразователями частоты и стали сторонниками использования статических преобразователей, являющихся более экономичными и надежными в эксплуатации и удобными в обслуживании.

За прошедшее время в проектировании тиристорных преобразователей частоты произошли серьезные изменения. Прежде всего, освоено производство современных тиристорных и диодов, появились новые магнитные материалы, а также стали доступны

ми современные технологии проектирования и изготовления [11–14]. Все это позволило предложить потребителям современные тиристорные преобразователи частоты пятого поколения, обеспечивающие совместную работу с цифровыми устройствами управления технологическими процессами.

### Силавая схема автономного инвертора

Упрощенная принципиальная схема традиционного несимметричного тиристорного инвертора с обратными диодами, примененная в ППЧ типа «Параллель», приведена на рис. 1. В ней содержатся четыре тиристора VS1–VS4, шунтированных обратными диодами VD1–VD4. Помимо блока силового полупроводникового (БСП), инвертор содержит входную дроссель L1 с двумя силовыми магнитосвязанными обмотками, блок дросселей L2 (коммутирующий дроссель), дроссели насыщения L3, L4, коммутирующие конденсаторы C1, C2 и нагрузочный резонансный контур — индуктор с токопроводами и блоком конденсаторов (БК), который подсоединяется к выходным контактам ППЧ.

Входной дроссель, отделяющий цепь постоянного тока от цепи ТВЧ, служит фильтром, препятствующим проникновению в сеть помех от ТВЧ. Коммутирующие конденсаторы и дроссели образуют последовательный колебательный контур — так называемый коммутирующий. При периодическом включении БСП он формирует квазисинусоидальные импульсы выходного тока, одновременно обеспечивая в каждом такте работы выключение, т. е. коммутацию тиристорно-диодного ключа, которым является БСП.

Дроссели насыщения при мгновенной величине токов через тиристоры в единицы ампер значительно увеличивают индуктивность коммутирующего контура, что снижает скорость нарастания и спада тока при коммутациях тиристорных и диодов и, следовательно, уменьшает тепловые потери в полупроводниковых структурах тиристорных, диодов и резисторов демпфирующих цепей.

В установившемся режиме инвертор работает следующим образом. Когда поступает очередной управляющий импульс на силовые тиристоры VS1–VS4, они включаются, а предварительно заряженные конденсаторы C1, C2 перезаряжаются по колебательному закону через дроссели насыщения, дроссели коммутирующие, БСП и нагрузку. При этом прямая полуволна тока БСП проходит через тиристоры, а обратная — через силовые диоды VD1–VD4. Длительность проводящего состояния диодов влияет на величину интервала времени, предоставляемого тиристорам для восстановления управляемости. Этот интервал работы определяется величиной емкости коммутирующих конденсаторов, индуктивности коммутирующих дросселей, а также параметрами нагрузки. Время прохождения обратного тока через диоды VD1–VD4 не должно быть меньше паспортного времени выключения силовых тиристорных, поскольку в противном случае возможен срыв инвертирования, когда тиристоры самопроизвольно включаются при положительном напряжении анод–катод, что может приводить к аварийному режиму инвертора.

При нормальной работе инвертора после выключения силовых диодов тиристоры выключены. К ним скачком прикладывается прямое напряжение значительной величины, равное алгебраической сумме мгновенных значений напряжения на нагрузке и конденсаторах C1, C2. Поэтому в состав БСП входят специальные демпфирующие компоненты.

Далее следует бестоковая пауза в работе БСП. В этом интервале времени за счет сглаженного входным дросселем L1 тока происходят дозарядка конденсаторов C1, C2 до начальной величины и восполнение накапливаемой ими энергии, частично израсходованной на рассмотренных интервалах вследствие ее выделения в нагрузку и активных потерь в элементах схемы. В установившемся режиме работы напряжение конденсаторов C1, C2 к концу бестоковой паузы равно исходному напряжению. Далее на тиристоры VS1–VS4 поступает следующий управляющий импульс и начинается формирование нового импульса

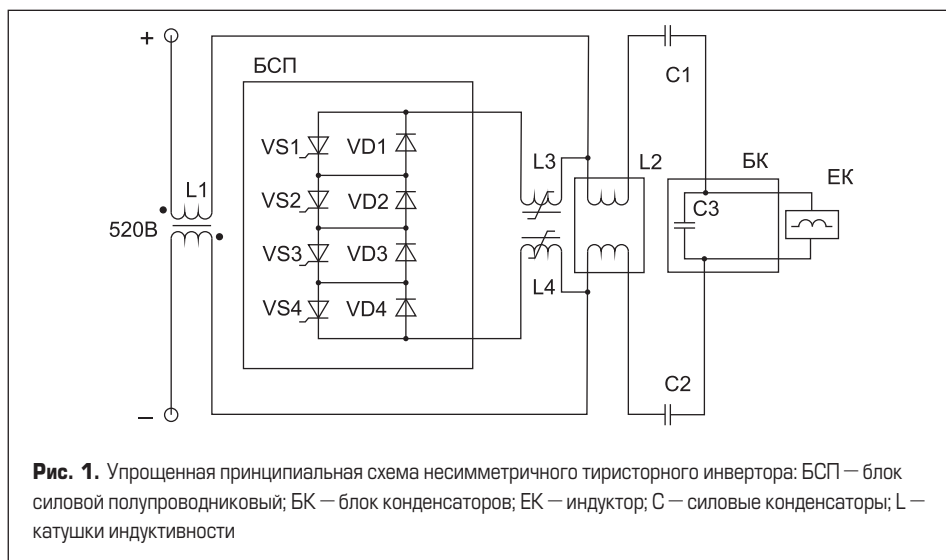


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема несимметричного тиристорного инвертора: БСП — блок силового полупроводникового; БК — блок конденсаторов; ЕК — индуктор; С — силовые конденсаторы; L — катушки индуктивности

выходного тока, а затем рассмотренные электромагнитные процессы повторяются.

Наряду с рассмотренным БСП в состав инвертора ППЧ входят входной дроссель L1 с двумя силовыми магнитосвязанными обмотками каждый, блок дросселей L2 (коммутирующий дроссель), дроссели насыщения L3, L4, коммутирующие конденсаторы C1, C2 и нагрузочный резонансный контур (индуктор с токопроводами и блок конденсаторов, который подключается к выходным контактам ППЧ).

### Назначение и конструкция блока управления и контроля

В состав тиристорного преобразователя отдельным блоком входит устройство управления силовыми тиристорами, которое выполнено по современной технологии. Блок управления и контроля (БУК) предназначен для следующего:

- предупредительного автоматического контроля ППЧ, его пуска, непрерывного контроля электрических режимов в процессе нормальной работы и аварийного отключения при возникновении аномальных режимов работы, а также для диагностики и индикации аварийных режимов;
- генерации импульсной последовательности с требуемой частотой импульсов выходного тока;
- формирования управляющих импульсов требуемой формы и амплитуды для включения тиристорных инверторов;
- формирования сигналов управления пуска и защиты ППЧ;
- автоподстройки выходной частоты ППЧ на резонансную частоту нагрузочного контура, регулирование электрического режима по сигналам пульта управления ППЧ, пульта управления нагревом, внешнего

регулятора или контроллера, для стабилизации электрических режимов ППЧ при возмущениях со стороны питающей сети и нагрузки;

- настройки и регулировки системы защиты и управления.

На рис. 2 приведена регулировочная характеристика резонансного контура нагрузки ППЧ. Функциональная схема БУК была показана на рис. 3 [11].

Входной сигнал, поступающий в БУК, является сигналом обратной связи системы автоматического регулирования выходного напряжения и автоподстройки под резонансную частоту нагрузочного контура индукционной установки. Регулирование мощности ППЧ, отдаваемой нагрузке, основано на ее резонансных свойствах. Изменение частоты управляющих импульсов БУК и вместе с ней частоты импульсов выходного тока ППЧ приводит к изменению мощности нагрузки в соответствии с графиком, представленным на рис. 2.

В режиме МОЩНОСТЬ ячейка автоматики (ЯА) автоматически подстраивает регулируемый параметр (напряжение нагрузки) под значение, заданное с пульта управления или из цепи «Внешний задатчик». В режиме ЧАСТОТА сигнал задания непосредственно воздействует на вход управляемого генератора. При достижении уставки релейного регулятора сигнал на входе управляемого генератора обнуляется, что приводит к сбросу мощности, а в режиме АВТОСТОП — к прекращению инвертирования. Релейное регулирование мощности осуществляется по способу, защищенному А.с.748789 (СССР).

Канал ограничения частоты ППЧ предназначен для ограничения частоты управляемого генератора БУК верхним и нижним пределами. Нижний предел частоты соответствует началу линейного участка регулировочной характеристики преобразователя.

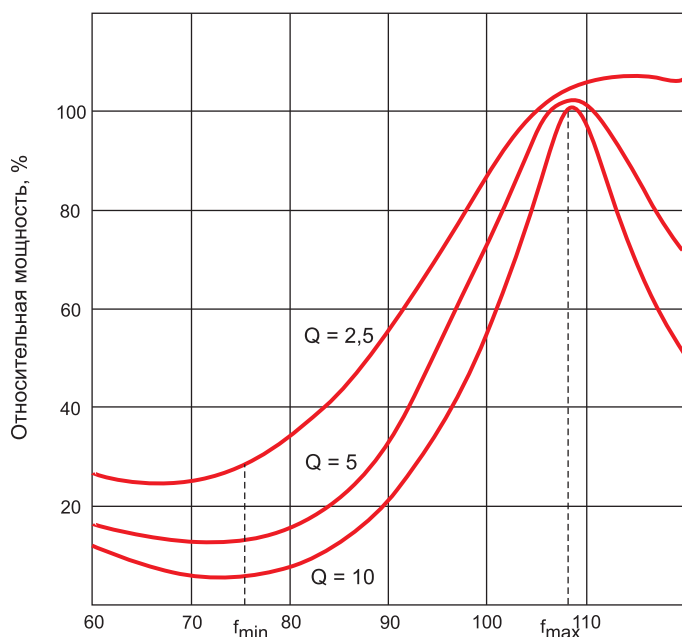


Рис. 2. Регулировочная характеристика нагрузки ППЧ:  $f$  — относительная частота импульсов управления БУК (%);  $Q$  — добротность нагрузочного колебательного контура

В случае, если в период сигнала «Q — добротность» укладывается лишнее число колебаний напряжения нагрузки, компаратор частоты ячейки автоматики БУК в режиме МОЩНОСТЬ увеличивает частоту управляемого генератора БУК, обеспечивая вхождение в рабочий диапазон регулировочной характеристики нагрузки. Дальнейшее регулирование частоты управляющих импульсов, генерируемых БУК, производится по сигналу задатчика, поступающего с пульта управления, либо с внешних устройств (контроллера, дистанционного пульта, регулятора температуры).

Помимо генерирования управляющих импульсов и регулирования выходной мощности, БУК обеспечивает с помощью устройства защиты предупредительный контроль и пуск изделия, отключение от сети при возникновении аварийных режимов, а также распознавание и индикацию типа аварийного режима. При этом БУК осуществляет гальваническую развязку цепей управления и сигнализации от силовой схемы ППЧ.

В состав БУК входят шесть конструктивно обособленных ячеек, выполненных на печатных платах.

- Ячейка питания (ЯП), подключенная к сети 220 В (50 Гц) через автоматический выключатель и контакты электромагнитного пускателя. На выходах ЯП формируются постоянные напряжения +6 и +40 В, стабилизированные напряжения +15 и -15 В, а также переменные напряжения высокой частоты амплитудой 24 В.
- Ячейка автоматики (ЯА), управляющая частотой управляющих импульсов тиристорного инвертора в функции сигналов цепей задатчика (в режиме ЗАДАНИЕ ВНУТР или ЗАДАНИЕ ВНЕШН). Сигналы цепей «Добротность» и «Напряжение нагрузки» являются сигналами обратной связи для системы автоподстройки ППЧ на резонансную частоту нагрузки и системы стабилизации его выходного напряжения.
- Ячейка управляемого генератора (ЯУГ), которая по сигналам цепи «Пуск Управляемого Генератора» или «Стоп Управляемого Генератора» начинает либо прекращает генерацию и формирование управляющих импульсов для тиристорных преобразователей частоты. Частота импульсов изменяется от минимума до максимума пропорционально сигналу цепи «Вход Управляемого Генератора».
- Ячейка контроля охлаждения (ЯКО), которая питается напряжением 36 В (50 Гц) через автоматический выключатель, контролирует сигналы терморезисторов системы охлаждения преобразователя. В случае превышения этими сигналами пороговых значений, во избежание перегрева элементов силовой схемы ППЧ, выдается предупреждающий сигнал, и с задержкой в 20–40 с происходит аварийное отключение ППЧ по цепи «Шина защиты».
- Ячейка пуска и защиты (ЯПЗ) непрерывно контролирует сигналы 16 датчиков параметров преобразователя. Если диагностическая информация датчиков свидетельствует

о наличии неисправности, ЯПЗ формирует сигналы в цепях «Управление пускателем», «Управление Тиристором Проходным» и «Пуск Управляемого Генератора». В аварийных режимах прекращается подача сигнала в цепях «Управление пускателем» и «Управление ТП», а по цепи «Шина защиты» включается индикатор ЗАЩИТА пульта управления.

- Ячейка удлинительная (ЯУ) представляет собой удлинитель-адаптер для наладочных и регулировочных работ с другими ячейками. Кроме того, ЯУ при установке на своем штатном месте служит при проверке БУК контрольной розеткой, на которую выведены цепи основных сигналов.

Общий вид БУК показан на рис. 3. БУК выполнен в унифицированном конструктивном блоке стандарта «Евромеханика», закрепленном в водоохлаждаемой нише ППЧ. На лицевые панели ячеек вынесены элементы, необходимые при обслуживании: светодиодные индикаторы, переключатели, подстроечные резисторы, гнезда для контроля режимов работы ППЧ. Ячейки БУК связаны между собой электрическим жгутом через разъемы. Связь с ППЧ осуществляется через отдельные разъемы в виде розетки и вилки, которые расположены на угольнике поверх каркаса.

### Элементы конструкции и размещение основных узлов тиристорных преобразователей частоты типа «Параллель»

Рассмотрим конструкцию современного тиристорного преобразователя частоты на примере преобразователя типа «Параллель» ППЧ-160-8,0/10,0,0, предназначенного для питания индукционных электротермических установок и управления электрическими режимами индукционных нагревателей (печей) в различных технологических процессах и при научных исследованиях.

Преобразователь заменяет устаревшие тиристорные преобразователи предыдущих разработок, выполненных на отечественных силовых элементах и компонентной базе, по сравнению с которыми он более экономичен, удобен и безопасен в эксплуатации, имеет меньшие размеры и более современный дизайн.

На рис. 4 показаны элементы конструкции и размещение узлов и блоков современного тиристорного преобразователя частоты. Конструкция преобразователя соответствует требованиям ГОСТ 12.2.007.10-87 «ССБТ. Установки, генераторы и нагреватели индукционные для электротермии, установки и генераторы ультразвуковые. Требования безопасности», ГОСТ 12.2.007.0-75 «ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности», ГОСТ 12.2.007.11-75 «ССБТ. Преобразователи энергии статические силовые. Требования безопасности».

Преобразователь конструктивно оформлен в виде металлического шкафа с двусторонним обслуживанием через две двери — переднюю и заднюю, снабженные замками и защитной



Рис. 3. Внешний вид БУК с лицевой стороны

блокировкой. Обе они соединены с каркасом гибкими перемычками. Шкаф установлен на цоколе, имеющем штуцеры для охлаждающей воды и окна для внешних присоединений.

Размещение основных узлов и блоков тиристорного преобразователя, приведенное на рис. 4, продиктовано традициями уфимской школы преобразователей. В нижней части шкафа установлены входная дроссель

и коммутирующие конденсаторы. Выше закреплены коллектор системы охлаждения, дроссели насыщения и блок дросселей, еще выше — БСП. В верхней части шкафа размещены БУК, БПК, БВВ, БВ, на передней двери находится ПУ. На боковых стенках установлены реле давления, манометр, трансформатор напряжения, в дверных проемах — микровыключатели блокировки дверей. В проеме задней двери и на внутренней стороне передней

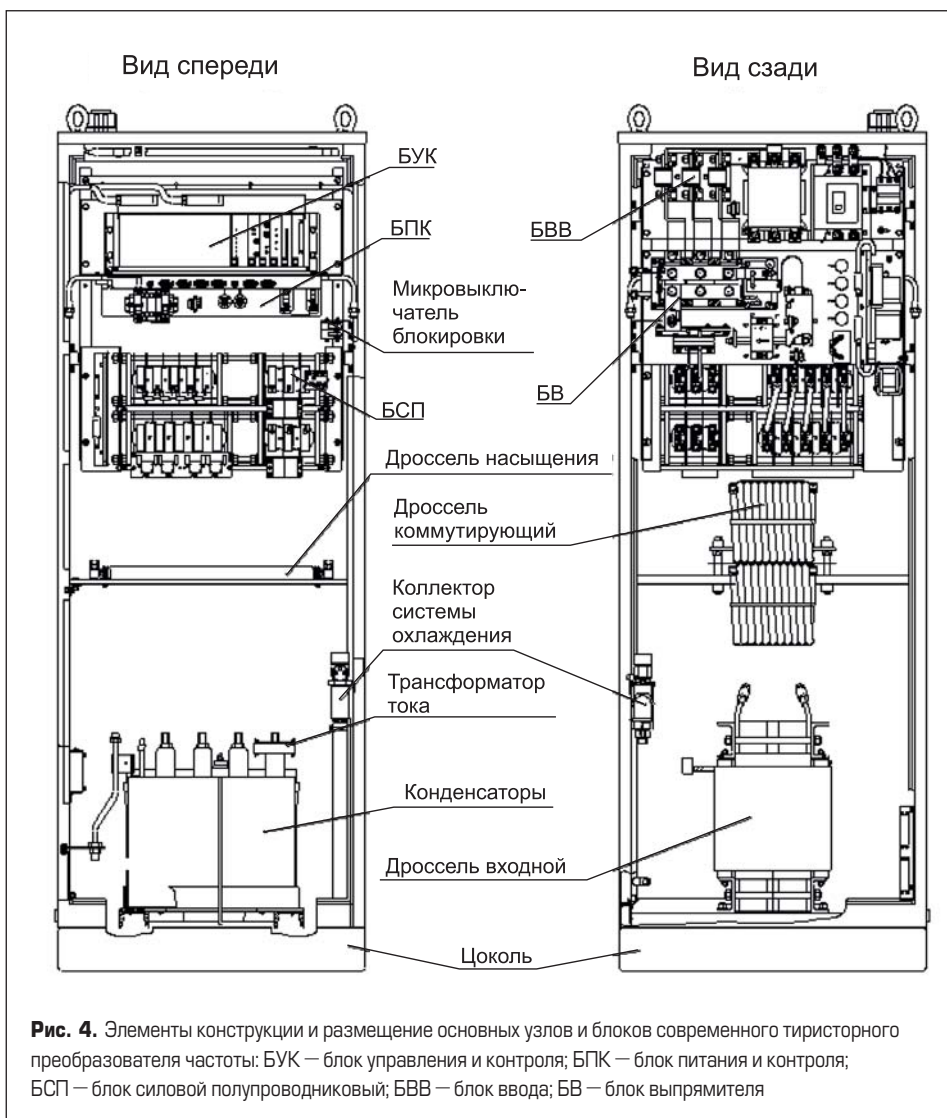


Рис. 4. Элементы конструкции и размещение основных узлов и блоков современного тиристорного преобразователя частоты: БУК — блок управления и контроля; БПК — блок питания и контроля; БСП — блок силовой полупроводниковый; БВВ — блок ввода; БВ — блок выпрямителя

над ПУ расположены светильники с люминесцентными лампами для подсветки узлов при техническом обслуживании.

Ввод силового питания осуществляется через кабельный ввод в крыше шкафа либо через дно непосредственно на верхние контакты сетевого выключателя. Левая стена шкафа используется в основном для электрических соединений, правая сторона — для гидравлических соединений.

Основу современного тиристорного преобразователя частоты составляет БСП, выполненный на основе четырех тиристоров VS1–VS4 и четырех силовых высокочастотных диодов VD1–VD4. Силовые выводы тиристоров шунтированы варисторами, демпфирующими RC-цепочками и скрученными парами проводов, которые связаны с блоком контроля инвертора БКИ.

Тиристоры VS1–VS4 включаются одновременно управляющими импульсами тока, поступающими от специального блока распределителя импульсов (БРИ). Он состоит из четырех трансформаторных узлов, входы которых через токоограничивающие резисторы параллельно подключены к цепям блока управления и контроля БУК. Блок распределителя импульсов предназначен для распределения импульсов по тиристорам инвертора и потенциальной развязки цепей управления тиристоров между собой и с низковольтным выходом БУК.

Вблизи моментов перехода через ноль тока БСП, в кривой тока ППЧ наблюдаются «ступеньки», связанные с нелинейностью дроссели насыщения, которые облегчают режим работы тиристоров и диодов инвертора. Дроссели насыщения при мгновенной величине токов через тиристоры в единицы ампер значительно увеличивают индуктивность коммутирующего контура. В результате этого снижается скорость нарастания и спадания тока при коммутациях тиристоров и диодов и, следовательно, уменьшаются тепловые потери в полупроводниковых структурах тиристоров, диодов и резисторов демпфирующих цепей.

Благодаря резонансным свойствам нагрузки ППЧ, в ней непрерывно происходят электромагнитные колебания, которые имеют форму, близкую к синусоиде. Переходные режимы работы инвертора, характеризующиеся изменением форм кривых токов и напряжений от периода к периоду, наблюдаются при пуске, отключении, регулировании мощности и резком изменении параметров нагрузки и питающего напряжения. Для обеспечения нормальной работы инвертора необходимо чередование интервалов проводимости и паузы в работе тиристоров, причем время, предоставляемое для восстановления управляемости тиристоров, не должно быть меньше паспортной величины.

Ручное управление и визуальный контроль режимов работы ППЧ осуществляются с выносного пульта управления (ПУ). Регулятор «ЗАДАНИЕ» ПУ служит элементом системы регулирования выходной мощности ППЧ. Режим работы регулятора определяется переключателем ЧАСТОТА/МОЩНОСТЬ

на лицевой панели БУК. В режиме ЧАСТОТА регулируется частота подачи управляющих импульсов на тиристоры инвертора. В режиме МОЩНОСТЬ регулятор определяет опорные напряжения системы автоматического регулирования ППЧ, которые изменяют его выходное напряжение.

Блок питания и контроля (БПК) предназначен для питания цепей пуска, контроля, сигнализации, управления, а также для подключения сервисных устройств при наладке ППЧ. На БПК установлены автоматические выключатели «220 В» и «36 В», розетки «220 В» и «36 В», лампа внутренней подсветки с выключателем, а также розетки «Iвхх», «Uвхх» и «Iвх» для контроля сигналов выходного тока, выходного напряжения и входного тока инвертора осциллографом или другим прибором. Функция «Проверка защиты» позволяет периодически проверять исправность системы аварийного отключения по каналу максимально-токовой защиты. Напряжения вторичной обмотки трансформатора в 36 В (50 Гц) питает цепи пуска, блокировки, контроля охлаждения, а также сервисные устройства.

Защита тиристоров инвертора от повреждений осуществляется с помощью варисторов. Если все вентили блока силовых полупроводников исправны, то во время предпускового контроля и при работе инвертора к ним приложены практически одинаковые напряжения, и в этом случае формируется сигнал, разрешающий пуск и работу инвертора. При неравномерном делении напряжения между силовыми вентилями, их пробое, замыкании или при потере класса хотя бы одним из тиристоров или диодов БУК формирует сигнал, свидетельствующий о неисправности БСП.

Водяная система охлаждения БСП обеспечивает минимальное значение токов утечки через воду из-за разности постоянных потенциалов охлаждаемых элементов и позволяет замедлить процессы электролиза, приводящие к образованию твердого осадка и растворению концов штуцеров внутри шлангов. Соединения выполнены в виде армированных поливинилхлоридных шлангов со специальной оконцовкой. Часть соединений гидравлической схемы представляет собой медные токопроводы силовой электрической схемы. Блок контроля охлаждения БКО (не показан на рис. 4) предназначен для распределения охлаждающей воды по ветвям системы охлаждения ППЧ, контроля давления на входе, а также контроля расхода и температуры воды в каждой из ветвей на ее выходе. БПК, закрепленный под нишей БУК внутри шкафа, представляет собой металлическую панель с выключателями и розетками.

#### Техническое описание тиристорного преобразователя ППЧ-160-8,0/10,0 УХЛ4

Условное обозначения преобразователя — «ПАРАЛЛЕЛЬ ППЧ-Х1-Х2-УХЛ4». Оно расшифровывается следующим образом: ПАРАЛЛЕЛЬ — фирменное наимено-

вание полупроводникового преобразователя частоты. Далее указаны номинальная мощность преобразователя — Х1 (кВт) и пределы рабочей частоты — Х2 (кГц). Затем следуют климатическое исполнение и категория размещения изделия согласно ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543.1-89 — УХЛ4. Товарные знаки НПО ПАРАЛЛЕЛЬ зарегистрированы в Государственном реестре, свидетельство Роспатента — № 167346 и № 141419. На рис. 5 приведена электрическая функциональная схема преобразователя частоты.

Принцип действия преобразователя состоит в статическом преобразовании электрической энергии трехфазной сети в постоянное напряжение, после чего происходит формирование квазисинусоидальных токовых импульсов, которые подаются в настроенный на номинальную частоту нагрузочный колебательный контур, включающий в себя индуктор и блок компенсирующих конденсаторов, а также в регулировании электрических режимов работы изменением частоты импульсов управления не полностью управляемыми полупроводниковыми ключами — тиристорами. По сигналам встроенного или внешнего задатчика преобразователь обеспечивает автоматическое либо ручное регулирование напряжения на индукторе электротермической установки или мощности, что позволяет управлять температурой нагрева металла в индукторе.

Сетевое трехфазное напряжение 380 В (50 (60) Гц) через блок БВВ подается в блок БВ, где неуправляемым выпрямителем преобразуется в постоянное напряжение величиной 520 В, которое через устройство защиты поступает на вход инвертора.

Инвертор преобразует постоянное напряжение 520 В в квазисинусоидальные импульсы выходного тока, частота следования которых равна частоте управляющих импульсов, поступающих на тиристоры инвертора от БУК. Импульсы выходного тока возбуждают в нагрузочном колебательном контуре затухающие колебания тока и напряжения, по форме близкие к синусоидальным. Контур нагрузки настроен на частоту, которая вдвое выше частоты следования выходных импульсов тока инвертора.

#### Пуск тиристорного преобразователя

Для пуска ППЧ автоматические выключатели БПК «220 В» и «36 В» должны быть включены, контакты микровыключателей дверей и цепь внешней блокировки изделия — замкнуты, давление воды должно быть достаточным для срабатывания реле давления. В случае недостаточного давления (отсутствия) воды контакты реле давления замкнуты, а цепь питания обмотки пускателя БПК разомкнута контактами реле давления. При этом на пульте управления горит красный светодиод ОХЛАЖДЕНИЕ.

Включение преобразователя производится нажатием на кнопку ПУ КОНТАКТОР ВКЛ или аналогичную кнопку ПУН. Обе эти кнопки подключают обмотку пускателя БПК к цепи 36 В (50 Гц). Цепь обмотки пускателя БПК, которая подключается к напряжению

36 В (50 Гц) от вторичной обмотки трансформатора БПК, образована последовательно соединенными выключателем «36 В» на БПК, кнопкой КОНТАКТОР ВКЛ и КОНТАКТОР ВЫКЛ на ПУ, контактами внешней цепи «Блокировка установки» и микровыключателями блокировки дверей.

Если все блокировки в порядке, то при нажатии кнопки КОНТАКТОР ВКЛ включается пускатель БПК. Он своими контактами шунтирует нажатую кнопку, что обеспечивает фиксацию БПК после того, как будут опущены кнопки ПУ (ПУН). Другими контактами пускатель БПК запитывает цепь «Питание БУК 220 В» и цепь «Питание пускателя 220 В», которая через твердотельное реле на БКВ связана с обмоткой силового пускателя (контактора) БВВ.

Когда твердотельное реле БКВ не включено (сигнал в цепи «Управление пускателем» нулевой), пускатель БВВ не запитан. В это время на выходе выпрямителя БВ появляется испытательное напряжение около 480 В. Это выходное напряжение удвоителя напряжения, подключенного к фазе С через выключатель «220В» БПК, контакты пускателя БПК-К1 и балластные резисторы БВ.

Следующий интервал времени необходим для предпускового контроля преобразователя. При этом БУК контролирует исправность системы охлаждения, исправность силовых

полупроводниковых приборов, а также отсутствие аварийных сигналов по восьми каналам защиты ЯПЗ (перегрузка по току, перенапряжения инвертора — четыре канала, перенапряжения выпрямителя, короткое замыкание на землю, срыв инвертора). При неисправности хотя бы одного из контролируемых узлов включение силового пускателя БВВ запрещено, а на лицевых панелях БУК-ЯПЗ, БУК-ЯКО горят красные светодиоды, указывающие причину отказа включения. Перечень неисправностей нанесен на лицевую панель БУК.

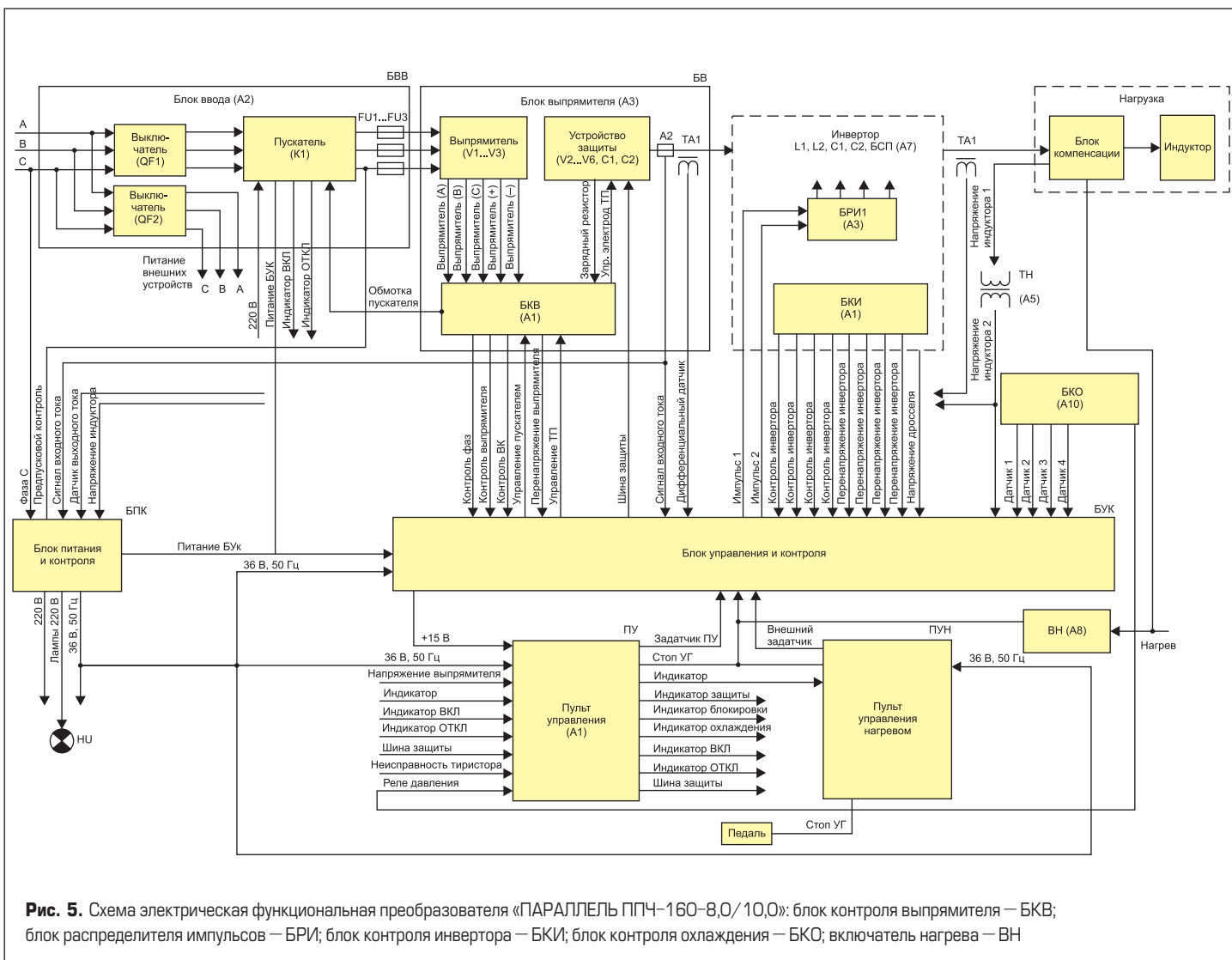
Если все контролируемые узлы исправны, то ЯПЗ по цепи «Управление пускателем» выдает сигнал, включающий твердотельное реле БВ, после чего включается пускатель БВВ и подается трехфазное питание на БВ. В следующий момент времени в цепь «Управление ТП» выдается сигнал постоянного тока, а также одновременно контролируется прохождение напряжений всех трех фаз питающей сети через предохранители БВВ на БВ. Если напряжения имеются и предохранители исправны, то моментально включается ТП, а затем формируется сигнал в цепи «Пуск УГ». Если же хотя бы один предохранитель неисправен либо отсутствует напряжение в фазе, то происходит аварийное отключение преобразователя, загорается светодиод ЗАЩИТА

на ПУ и светодиод НЕТ ФАЗЫ на БУК ЯПЗ. А при нормальном пуске, начиная с этого момента, инвертор готов к генерации ТВЧ, и тотчас при появлении сигнала НАГРЕВ в цепи «Стоп УГ» (нажатие кнопки НАГРЕВ на ПУ либо приход сигнала НАГРЕВ ВКЛЮЧИТЬ внешнего контроллера) возникают управляющие импульсы БУК, и инвертор начинает генерировать ТВЧ.

**Выключение преобразователя**

Чтобы прекратить генерацию ТВЧ, нужно повторно нажать кнопку НАГРЕВ. Светодиод на ней погаснет, а цепь «Стоп УГ» замкнется, что приведет к плавному снижению частоты выходного тока изделия и последующему прекращению генерации вследствие снятия импульсов управления с тиристоров. Выходное напряжение отсутствует, однако силовая схема подключена к сети и ее элементы находятся под напряжением, поскольку БВВ включен. Наступает режим ОЖИДАНИЕ, когда преобразователь готов к повторному включению нагрева.

Отключение преобразователя от сети производится нажатием кнопки КОНТАКТОР ВЫКЛ на ПУ либо ПУН. При этом обесточивается обмотка пускателя БПК, который разрывает цепи питания силового пускателя БВВ,



**Рис. 5.** Схема электрическая функциональная преобразователя «ПАРАЛЛЕЛЬ ППЧ-160-8,0/10,0»: блок контроля выпрямителя — БКВ; блок распределителя импульсов — БРИ; блок контроля инвертора — БКИ; блок контроля охлаждения — БКО; включатель нагрева — ВН

БУК и балластных резисторов БПК, питающих одну фазу выпрямителя в режиме предпускового контроля. После разряда конденсаторов силовой схемы и исчезновения напряжения на ее элементах прекращается сигнал постоянного тока в цепи «Управление ТП».

В отключенном состоянии силового пускателя в ППЧ остаются напряжения: 380 В (50 Гц) — на контактах двух автоматических выключателей БВВ, входных контактах силового пускателя, на контактах линейки клемм и разъемов; 220 В (50 Гц) — в БПК (выключатель «220 В», розетки «220 В», лампа и выключатель «СВЕТ»), БВ (трансформатор), микровыключателе передней двери шкафа, лампе задней двери; 36 В (50 Гц) — на БВ, БПК, ПУ, БВ, БС, БУК=ЯКО и на микровыключателях дверей. Для резервирования системы защиты преобразователя либо отказа выпрямителя аварийное отключение обеспечивается специальными быстродействующими предохранителями. Для полного обесточивания преобразователя необходимо снять с него питание внешним выключателем (рубильником).

### Аварийные отключения

Устройство защиты, входящее в состав БВ, представляет собой проходной транзистор ТП. Оно служит для подачи на вход инвертора напряжения 520 В при пуске и для отключения инвертора от выпрямителя при наступлении аварийного режима, когда с выхода БУК «Управление ТП» снимается сигнал управления ТП.

Преобразователь имеет защиту, отключающую силовое питание при недопустимых перегрузках по току, при перенапряжениях на силовых полупроводниковых приборах, при снижении давления, прекращении подачи и перегреве охлаждающей воды, при открытии дверей шкафа или размыкании цепи внешней блокировки, при замыкании индуктора на землю. Преобразователь снабжен развитой системой контроля и диагностики, предотвращающей пуск и работу при неисправностях в силовой схеме, а также светодиодами индикаторами неисправностей.

Аварийные режимы и отключения возникают тогда, когда происходят перегрузка по току, перенапряжения на элементах силовой схемы, срыв инвертора, замыкание на землю цепей выпрямленного тока или нагрузки, пропадание или отсутствие при пуске хотя бы одной фазы питающей сети, в том числе из-за перегорания силового быстродействующего предохранителя на БВВ, перегрев свыше 45 °С или продолжительное (свыше 2–4 с) отсутствие воды хотя бы в одном канале системы охлаждения.

В аварийных режимах включается тиристор БУК=ЯПЗ, и в цепи «Шина защиты», скачкообразно устанавливается напряжение низкого уровня, благодаря чему загорается красный индикатор ЗАЩИТА на ПУ. Одновременно БУК=ЯПЗ по цепям «Управление пускателем» и «Управление ТП» снимает питание с обмотки силового

пускателя БВВ (через твердотельное реле БВ=БКВ) и управляющий сигнал с ТП. При этом практически мгновенно разрывается цепь ТП, а затем отключается силовой пускатель БВВ. Силовая схема остается связанной с одной фазой сети через балластные резисторы БПК, а БУК остается запитанным напряжением 220 В (50 Гц). Это обеспечивает свечение аварийных индикаторов красного цвета на ПУ, а также красных светодиодов на лицевой панели БУК=ЯПЗ, облегчающих поиск неисправностей.

Повторное включение возможно только после сброса защиты двойным нажатием на красную кнопку КОНТАКТОР ВЫКЛ на ПУ (ПУН), что приводит к обесточиванию БУК. Если защита сработала по сигналу БУК=ЯКО, то необходим сброс БУК=ЯКО выключателем БПК-QF2 «36 В».

Если во время работы преобразователя возникают неисправности, приводящие к появлению сигналов высокого уровня в цепи «Контроль ВК», «Контроль выпрямителя» или «Контроль охлаждения», то БУК=ЯПЗ по цепям «Управление пускателем» и «Управление ТП» снимает управляющий сигнал с ТП и выключает силовой пускатель БВВ-К1. Это приводит к отключению силовой схемы от трехфазной сети с индикацией причины красными светодиодами БУК=ЯПЗ. При неисправностях в системе охлаждения загорается красный индикатор ОХЛАЖДЕНИЕ на ПУ.

Неисправность тиристорного инвертора в режиме предпускового контроля приводит к запрету включения силового пускателя. Если такая неисправность (снижение напряжения на тиристоре ниже нормы) возникает, импульсы управления продолжают поступать на инвертор. При этом горят красные светодиоды ЗАЩИТА на ПУ, предупреждающие оператора о неисправности и необходимости после окончания техпроцесса отключить установку.

Если будет отпущено реле давления, будут открыты двери шкафа или произойдет размыкание цепи внешней блокировки, то разрывается цепь питания пускателя БПК и изделие отключается от сети с индикацией причин отключения светодиодами на ПУ. В случае отказа системы защиты либо выпрямителя аварийное отключение обеспечивается специальными быстродействующими предохранителями, расположенными на БВВ.

### Регулирование мощности

Регулирование мощности преобразователя производится либо вручную — задатчиком ПУ или ПУН, либо автоматически — от внешнего регулятора или контроллера с управляющим сигналом 0–10 В постоянного тока. Возможно также или релейное управление мощностью с помощью педали, кнопки, тумблера, реле, или управление посредством технологического регулятора температуры с релейным выходом. Режимы регулирования мощности определяются положением переключателей: ЗАДАНИЕ ВНУТРЕННЕЕ/

ВНЕШНЕЕ, МОЩНОСТЬ/ЧАСТОТА на лицевой панели БУК=ЯА, а также АВТОСТОП на лицевой панели БУК=ЯУГ.

Преобразователь обеспечивает два режима непрерывного регулирования мощности: регулирование частоты от минимальной до максимальной — переключатель БУК=ЯА в положении ЧАСТОТА; автоматическое регулирование (стабилизация) напряжения нагрузки — переключатель БУК=ЯА в положении МОЩНОСТЬ. В этих режимах сигнал задания может поступать как от ручного датчика на ПУ (переключатель БУК=ЯУ в положении ВНУТРЕННЕЕ), так и от внешних устройств — ПУН, контроллер, регулятор температуры (переключатель БУК=ЯА в положении ВНЕШНЕЕ).

Преобразователь обеспечивает релейное регулирование среднего напряжения нагрузки или другого технологического параметра (например, температуры) путем включения/отключения нагрева ТВЧ. Исполнительные контакты регулятора подключаются к цепи «СТОП УГ», причем замыкание цепи приводит к сбросу частоты до минимума и прекращению генерации ТВЧ.

Дополнительная функция АВТОСТОП вводится посредством замыкания переключателя БУК=ЯУГ. В режиме АВТОСТОП при снижении сигнала задания ниже 0,5 В происходит автоматический сброс частоты до минимума и прекращение генерации ТВЧ. Эта функция используется тогда, когда необходимо дополнительно снизить нижний предел регулирования среднего значения мощности в нагрузке.

### Основные технические параметры и особенности преобразователя

Преобразователь подключается к сети трехфазного тока напряжением 380 В (10% с глухозаземленной нейтралью частотой 50 (60) Гц).

Номинальное напряжение на выходных контактах для подключения гибких токопроводов индукционной печи составляет 400 В, регулируемое — 100–500 В. Номинальная частота напряжения на индукторе равна 8/10кГц; регулируемая — 6–10 кГц. Номинальная мощность на выходе составляет 160 кВт, регулируемая (при cosφ индуктора, равном 0,2) — 10–100%. Электрический коэффициент полезного действия — не менее 0,88.

Масса равна 500 кг, габариты шкафа с рымболтами — 700×800×1956 мм.

Минимальный срок службы — 10 лет. Срок службы тиристорных преобразователей частоты типа ПАРАЛЛЕЛЬ значительно превышает гарантийный срок эксплуатации.

Режим работы преобразователя — длительный (ПВ = 100%).

Степень защиты шкафа преобразователя по ГОСТ 14254-96 (исключая контакты для подключения индуктора) — IP54.

На рис. 6 показаны внешние подключения и общий вид преобразователя частоты.

Нагрузкой преобразователя могут быть индукционные нагреватели (печи, закалочные посты) с напряжением питания

до 500 В. Преобразователь имеет разъем внешнего управления для связи с технологическим контроллером либо с пультом управления нагревом. На отдельную розетку введены вход управления мощностью нормированным сигналом 0–10 В, вход релейного управления нагревом, цепь включения контактора, цепь «аварийный стоп». Разъемы «БК» и «ПУН», установленные на цоколе шкафа, предназначены для связи с внешними устройствами — блоком компенсации и пультом управления нагревом. Гальванически изолированный вход релейного управления нагревом выведен на розетку «ВН».

На цоколе также могут находиться другие разъемы для связи с приводом, станцией охлаждения и т. п. Если в составе установки нет внешних устройств, в соответствующий этому устройству разъем вставлена заглушка.

### Условия эксплуатации

Температура окружающего воздуха должна находиться в диапазоне +15...+35 °С. Окружающая среда должна быть невзрывоопасной и не должна содержать токопроводящую пыль, агрессивные пары и газы, способные нарушить нормальную работу преобразователя. Относительная влажность при +20 °С не должна превышать 80%.

Охлаждение водяное, принудительное. Номинальный расход воды — 1,2 м<sup>3</sup>/ч. Перепад давления между входом и выходом при номинальном расходе — не более 2 кгс/см<sup>2</sup>. Мощность отводимых водой потерь — не более 22 кВт. Диаметр условного прохода напорной и сливной труб системы охлаждения — 20 мм (резьба трубная G3/4"). Минимальное давление воды на входе — 2 кгс/

см<sup>2</sup>; максимальное — 4 кгс/см<sup>2</sup>. Максимальная температура воды на входе — 25 °С.

Минимальная температура воды на входе, во избежание появления росы, не должна быть ниже температуры воздуха более чем на 15 °С. Конденсат, в зависимости от температуры и влажности, может образовываться, если температура воды на входе ниже 18–20 °С в средней полосе, 22–24 °С — в субтропиках, 28 °С — в тропиках.

Качество воды должно отвечать следующим требованиям хозяйственно-питьевого водопровода: жесткость — не более 5 мг-экв./л; содержание взвешенных веществ (мутность) — не более 3 мг/л, активного хлора — 0,5 мг/л, железа — 0,3 мг/л, рН — 7,8–8,3; удельное электрическое сопротивление — не менее 10 кОм·см.

Для обеспечения длительной надежной работы преобразователя и снижения трудоемкости профилактического ухода рекомендуется комплектовать преобразователь станцией охлаждения ПАРАЛЛЕЛЬ СО-40. Удельное сопротивление воды в «чистом» контуре должно быть не менее 50 кОм·см [14].

Преобразователь по нормам безопасности соответствует ГОСТ 12.2.007.075. Он снабжен приборами местного контроля выходного тока и напряжения, погрешность которых не превышает 2,5%, а также индикатором выходного напряжения инвертора в масштабе 0–10 В, что соответствует 0–100% выходного напряжения.

В преобразователе предусмотрено включение ламп местного освещения при обслуживании с открытыми дверями и розетки 220 и 36 В для питания сервисных устройств (осциллографа, переносной лампы). Конструкция преобразователя обеспечивает взаимозаменяемость однотипных элементов, узлов, блоков, ячеек.

### Заключение

При проектировании современных тиристорных преобразователей частоты для индукционного нагрева металлов учитывается необходимость постоянного визуального и непосредственного контакта обслуживающего персонала с преобразователем, внешними устройствами управления и технологическим оборудованием.

Современные полупроводниковые преобразователи частоты типа «Параллель» относятся к пятому поколению преобразователей по классификации ESTEL, исходя из возможности применения в системе регулирования цифрового управления, что позволяет осуществить эффективную замену устаревших ППЧ предыдущих поколений.

Использование современных тиристорных преобразователей частоты, благодаря приданию им новых функций, обеспечиваемых системой управления, в целом обеспечивает техническую модернизацию существующих технологических установок нагрева ТВЧ.

### Литература

1. [www.ruscastings.ru/work/168/5615/5621/9281](http://www.ruscastings.ru/work/168/5615/5621/9281).
2. Зинин Ю. Дело жизни // Силовая электроника. 2013. № 5.
3. [www.prl.ru](http://www.prl.ru)
4. А.с. СССР №851700. Преобразователь частоты.
5. А.с. СССР №748727. Способ регулирования электрических параметров преобразователя частоты с резонансной нагрузкой.
6. А.с. СССР №1095304. Способ защиты инвертора.
7. А.с. СССР №1184042. Устройство для защиты инвертора.
8. А.с. СССР №1636921. Устройство для контроля и защиты вентильного преобразователя.
9. А.с. СССР №1543512. Преобразователь частоты с блоком конденсаторной защиты.
10. Зинин Ю., Мульменко М. Новые разработки силовых преобразователей типа «Параллель» для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2014. № 2.
11. Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева труб большого диаметра / Ю. Зинин, А. Иванов, М. Мульменко, А. Уржумсков // Силовая электроника. 2014. № 6.
12. Эраносян С. Унификация — основной путь создания высоконадежных систем вторичного электропитания для комплексов военного и коммерческого назначения. Ч. 1 // Силовая электроника. 2014. № 5.
13. Эраносян С. Унификация — основной путь создания высоконадежных систем вторичного электропитания для комплексов военного и коммерческого назначения. Ч. 2 // Силовая электроника. 2014. № 6.
14. Зинин Ю., Мульменко М. Проектирование станций охлаждения для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2015. № 2.

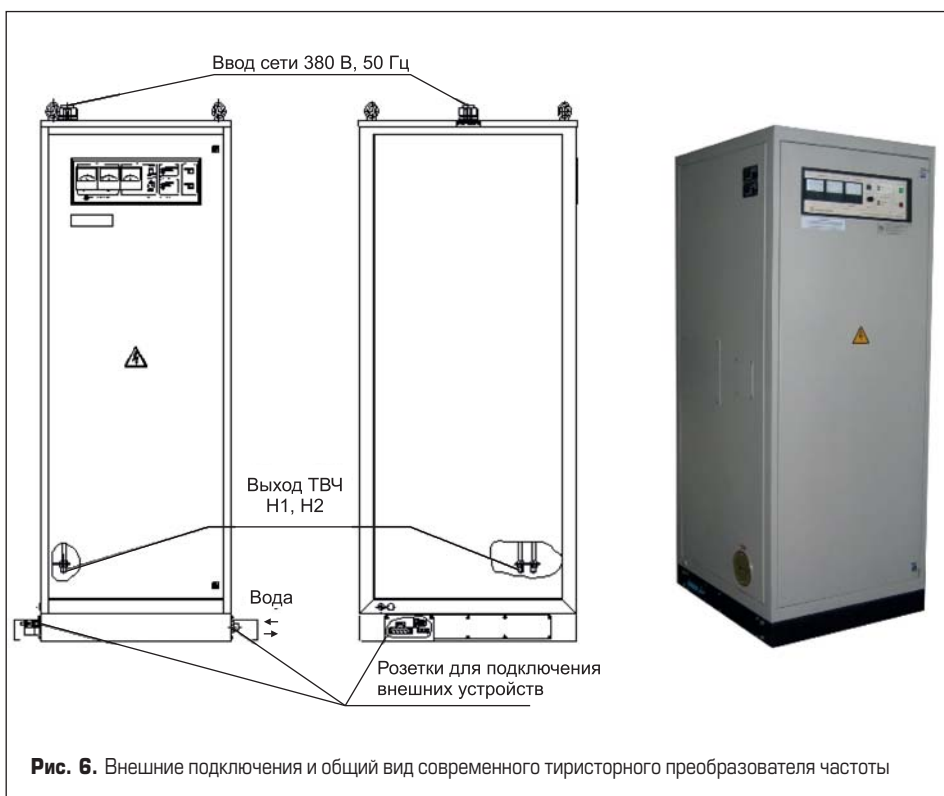


Рис. 6. Внешние подключения и общий вид современного тиристорного преобразователя частоты