

# Тиристорные преобразователи частоты

## для индукционного нагрева труб большого диаметра

**В статье приведены технические характеристики статических преобразователей частоты, разработанных для индукционного нагрева стальных труб и трубных заготовок большого диаметра, а также рассмотрены их устройство и принцип действия. Описана разработка тиристорного преобразователя частоты «Параллель ППЧ-320-2,4 УХЛ4». Дан пример промышленного использования преобразователя частоты мощностью 320 кВт и частотой 2,4 кГц, а также представлены особенности работы преобразователя частоты в автоматической линии методического нагрева трубы с использованием индукционных нагревателей повышенной частоты.**

**Юрий Зинин**

umz42@mail.ru

**Александр Иванов**

ivanov@prl.ru

**Михаил Мульменко**

mulmenko@prl.ru

**Анатолий Уржумсков**

amu@prl.ru

### Введение

В российской промышленности возрастает спрос на технологические процессы интенсивного нагрева стальных труб с целью высокочастотной термообработки, для нанесения изолирующих покрытий, пластической деформации и т. д. Эти направления во многом определяют развитие техники в области отечественной силовой электроники.

Прошло почти 100 лет с того времени, когда в 1916 г. профессор Н.Д. Папалекси, впервые в России, применил высокочастотный нагрев металлов в вакууме для их обезгаживания [1]. С этой поры и ведется разработка новых источников питания для установок нагрева токами высокой частоты. Электромашинные генераторы частоты, статические — ионные, ламповые преобразователи, а затем тиристорные и транзисторные, использовались в индукционных установках для нагрева металлов [2, 3]. В настоящее время статические транзисторные или тиристорные преобразователи проектируются специально для различных установок индукционного нагрева металлов с учетом специфики их применения в различных отраслях металлообработки [4].

Научно-производственное объединение «Параллель» (г. Уфа) [5], основным видом деятельности которого являются научные исследования и разработки в области технических наук, в частности, проектирование промышленного оборудования для передовых технологических процессов и производств, следуя современным тенденциям, специализируется на разработке статических преобразователей частоты на основе IGBT-транзисторов, тиристоров и диодов, а также различных индукционных установок на их основе.

Разработанные индукционные установки типа «Параллель ИНТ» (индукционный нагрев труб) предназначены для высокочастотного нагрева труб и прутков в таких технологических процессах, как сушка, отжиг, нанесение покрытий, очистка труб и буровых штанг от отложений, нагрев замков перед наворачиванием на бурильные трубы, локальный нагрев при изготовлении трубных отводов, тройников и др.

Разработанная НПО «Параллель» линейка индукционных нагревателей обеспечивает нагрев труб диаметром от 59 до 1420 мм. Номинальная мощность установки, определяющаяся техническими требованиями при нагреве, зависит от скорости подачи трубы, ее типоразмера и требуемой температуры нагрева.

Малогабаритные преобразователи серии ИНТ, имеющие небольшую мощность (до 100 кВт) и высокую частоту, изготавливаются на базе IGBT-транзисторов [4]. Однако промышленные объемы обработки труб большого диаметра на автоматических поточных линиях требуют значительного увеличения единичной мощности преобразователей, которые целесообразно делать на мощных высоковольтных тиристорах и диодах.

НПО «Параллель» разработало и освоило производство тиристорных преобразователей для индукционного нагрева труб большого диаметра мощностью 160, 250, 320 и 400 кВт. При этом потребность индукционных нагревателей в мощности 500, 630 и 800 кВт обеспечивается параллельной работой двух преобразователей на один общий нагреватель. Разработанные преобразователи имеют много общих конструктивных узлов, что обеспечивает их унификацию.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает мощные высокочастотные тири-



**Рис. 1.** Общий вид тиристорного преобразователя «Параллель ППЧ-320-2,4 УХЛ4» и внешние подключения к нему

сторы ТБИ и ТВЧ, диоды ДЧ, кремниевые резисторы РК и другие компоненты силовой электроники, необходимые при конструировании полупроводниковых преобразователей повышенной частоты, работающих на колебательные контуры индукционного нагрева.

### Технические требования к разработке преобразователя частоты «Параллель ППЧ-320-2,4 УХЛ4»

Рассмотрим специфические вопросы учета технических требований при разработке мощного тиристорного преобразователя частоты для индукционного нагрева стальных труб большого диаметра, а также особенности его конструирования. Нагрев трубы происходит в индукционном нагревателе, который представляет собой водоохлаждаемый проходной индуктор с параллельно подключенными электротермическими (печными) конденсаторами.

Преобразователь частоты «Параллель ППЧ-320-2,4» предназначен для питания индукционных электротермических установок и управления электрическим режимом индукционных нагревателей (печей) в различных технологических процессах и при научных исследованиях. Преобразователь заменяет в автоматических линиях нагрева труб устаревшие высокочастотные нагревательные установки с ламповыми генераторами и среднечастотные установки с машинными преобразователями. Тиристорный преобразователь большой мощности (свыше 100 кВт) должен иметь современный дизайн, а также должен быть экономичен, удобен и безопасен в эксплуатации.

Общий вид преобразователя «Параллель ППЧ-320-2,4 УХЛ4» и внешние подключения к нему показаны на рис. 1.

С учетом условий эксплуатации к преобразователю могут подключаться водоохлаждаемый токопровод для соединения с нагрузкой и выносной пульт управления нагревом.

Обозначение «Параллель ППЧ-320-2,4 УХЛ4» расшифровывается следующим образом: «Параллель» — товарный знак, зарегистрированный в Государственном реестре, наименование изделия — ППЧ (полупроводниковый преобразователь частоты), 320 кВт — номинальная мощность, 2,4 кГц — рабочая частота, УХЛ4 — изделие предназначено для эксплуатации в производственных помещениях, в районах с УХЛ (умеренным и холодным климатом).

Авторские права на использование основных технических решений в преобразователе частоты защищены авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ [6–13].

Преобразователь подключается к сети переменного трехфазного тока с глухо заземленной нейтральной частотой 50 (60) Гц и с линейным напряжением 380 В  $\pm 10\%$ . Фазный ток питающей сети (действующее значение) — не более 550 А.

Номинальное напряжение на выходных контактах для подключения токопроводов нагрузки при работе на индукционный нагреватель (печь) с батареей компенсирующих конденсаторов составляет 800 В, регулировка выходного напряжения осуществляется в пределах 200–800 В. Нагрузкой преобразователя могут быть индукционные нагреватели (печи, закалочные посты и т. п.) с напряжением питания от 400 до 800 В. Режим работы преобразователя — длительный, ПВ — 100%.

Номинальная частота напряжения на индукторе равна 2,4 кГц, регулируемая — 2–2,4 кГц. Номинальная мощность составляет 320 кВт, регулируемая ( $\cos\phi$  индуктора = 0,2) — 10–100%. Электрический коэффициент полезного действия — не менее 0,94. Номинальный ток на выходе (действующее значение) равен 670 А.

Габариты шкафа с рым-болтами — 700×800×1956 мм, масса — 700 кг. Минимальный срок службы — 10 лет, но есть примеры, когда тиристорные преобразователи частоты эксплуатировались на предприятиях более 20 лет.

Степень защиты шкафа преобразователя — по ГОСТ 14254-96 — IP54. Температура окружающего воздуха составляет +15...+35 °С, окружающая среда не взрывоопасная, она не должна содержать токопроводящую пыль, агрессивные пары и газы, способные нарушить нормальную работу преобразователя. Относительная влажность воздуха при +20 °С должна быть не более 80%. Преобразователь по нормам безопасности должен соответствовать ГОСТ 12.2.007.0-75.

Надежная работа преобразователя определяется условиями охлаждения его силовых элементов — полупроводниковых приборов, силовых конденсаторов, катушек индуктивности и др. Охлаждение преобразователя —

водяное, принудительное. Это очень важный момент, во многом определяющий надежную работу преобразователя, поэтому широко используются специальные станции охлаждения [5].

Минимальное давление воды на входе системы водоснабжения составляет 2 кгс/см<sup>2</sup>, максимальное — 4 кгс/см<sup>2</sup>. Максимальная температура воды на входе — 25 °С. Качество воды должно отвечать следующим требованиям: хозяйственно-питьевая водопроводная с жесткостью не более 5 мг-экв/л, с рН, равным 7,8–8,3, с содержанием взвешенных веществ (мутностью) не более 3 мг/л, с содержанием активного хлора 0,5 мг/л и железа 0,3 мг/л. Удельное электрическое сопротивление воды должно быть не менее 10 кОм·см.

Номинальный расход воды не должен быть более 3 м<sup>3</sup>/ч, перепад давления воды при номинальном расходе — не более 4 кгс/см<sup>2</sup>, мощность отводимых водой потерь — не более 25 кВт. Диаметр условного прохода напорной и сливной труб системы охлаждения равен 20 мм (резьба трубная G3/4").

Для обеспечения длительной работы преобразователя и нагревательной установки преобразователь снабжается станцией охлаждения «Параллель СО-40». При параллельной работе двух преобразователей общей мощностью 630 кВт требуется станция охлаждения «Параллель СО-60». Удельное сопротивление воды в «чистом» контуре должно быть не менее 50 кОм·см.

### Функциональная схема преобразователя частоты

Принцип действия преобразователя частоты заключается в преобразовании электрической энергии постоянного напряжения выпрямителя трехфазной сети частотой 50 Гц в квазисинусоидальный однофазный выходной ток повышенной частоты 2400 Гц, питающий колебательный контур нагрузки, в который входят индуктор и блок компенсирующих (печных) конденсаторов. Путем изменения частоты переключения полупроводниковых ключей (тиристоров) относительно резонансной частоты параллельного колебательного контура нагрузки преобразователь изменяет уровень напряжения на индукторе, что, в итоге, позволяет управлять температурой нагрева металла нагреваемого изделия (трубы), передвигающейся внутри индуктора.

Инвертор преобразует постоянное напряжение 520 В в квазисинусоидальные импульсы выходного тока, частота следования которых определяется частотой управляющих импульсов, поступающих на тиристоры инвертора от блока управления и контроля. Импульсы выходного тока инвертора, имеющие положительную и отрицательную полярность, возбуждают в нагрузочном параллельном контуре незатухающие колебания тока и напряжения, по форме близкие к синусоидальным. В номинальном режиме рабочая частота контура нагрузки соответствует частоте импульсов выходного тока преобразователя.

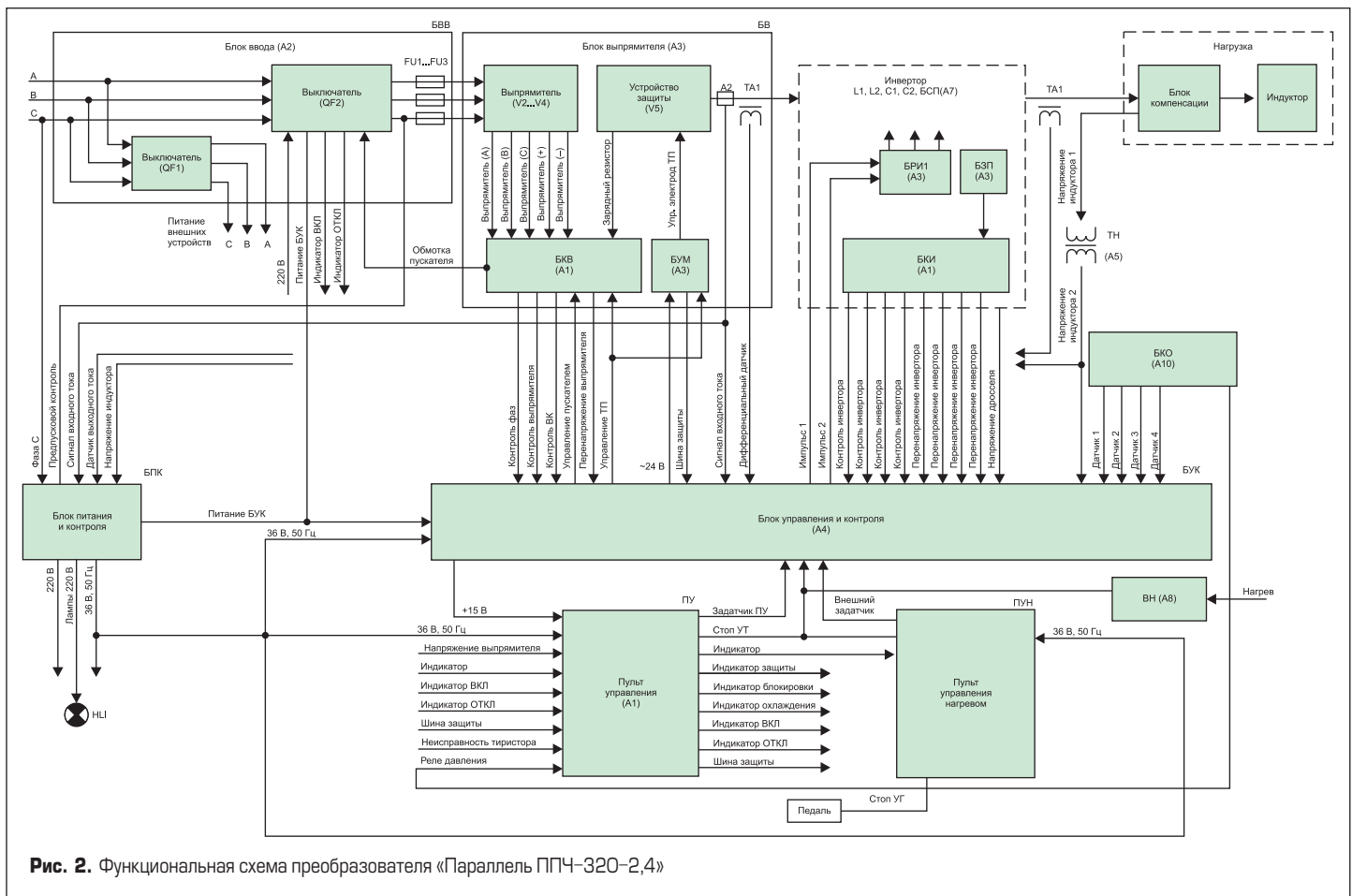


Рис. 2. Функциональная схема преобразователя «Параллель ППЧ-320-2,4»

Функциональная схема преобразователя представлена на рис. 2.

Блок ввода БВВ состоит из автоматических выключателей QF1, QF2, пускателя K1 и быстродействующих предохранителей FU1–FU3. Между выключателем QF2 и предохранителями FU1–FU3 размещены помехоподавляющие конденсаторы с разрядными резисторами. Выключатель QF1 защищает цепи питания внешних устройств преобразователя (станции охлаждения, электроприводов и т. д.) Цепи питания внешних устройств, а также управления и контроля выведены на розетку.

БВ — блок выпрямителя. Переменное трехфазное напряжение 380 В с частотой 50 (60) Гц преобразуется выпрямителем в постоянное напряжение величиной 520 В, которое через устройство защиты поступает на вход инвертора. Устройство защиты, входящее в состав БВ, представляет собой проходной транзистор (IGBT-модуль). Он служит для подачи напряжения 520 В на вход инвертора при его пуске и отключении от выпрямителя в случае наступления аварийного режима.

Неуправляемый выпрямитель выполнен по трехфазной мостовой схеме на силовых полупроводниковых модулях-диодах. В цепи постоянного тока включены проходной транзистор (IGBT-модуль со встроенным обратным диодом), датчик тока, измерительный шунт и дифференциальный трансформатор тока.

ТП — проходной транзистор. Он выполняет функцию силового ключа, соединяющего выпрямитель с инвертором. Этот транзистор

снабжен демфирующей цепью — снаббером, состоящим из конденсатора, диода, варистора и резисторов. ТП включается после предпускового контроля исправности преобразователя. В момент срабатывания защиты прекращается подача постоянного напряжения управления на ТП, в результате чего он выключается. При этом ток в проходном транзисторе прерывается, ток входного дросселя перехватывается диодом и плавно снижается до нуля. К выходу выпрямителя подключены две RC-цепочки, которые в режиме предпускового контроля вместе с диодами модулей образуют схему выпрямителя с удвоением напряжения, входом которой являются цепи «Фаза С» и «Фаза N».

БПК — блок питания и контроля. Он предназначен для питания цепей пуска, контроля, сигнализации, управления, а также для подключения сервисных устройств при наладке преобразователя. На БПК установлены автоматические выключатели «220В» и «36В», розетки «220В» и «36В», выключатель «Свет» для лампы внутренней подсветки, а также розетки «Iвх», «Uвх» и «Iвх» для контроля сигналов выходного тока, выходного напряжения и входного тока инвертора.

ПУ — пульт управления преобразователем. Этот пульт позволяет осуществлять ручное управление и визуальный контроль работы изделия. Перемножением показаний вольтметра и амперметра определяется мощность, потребляемая инвертором от выпрямителя. Вольтметр является индикатором выходного напряжения инвертора (10 В со-

ответствуют номинальному напряжению). Кнопки пульта служат для включения и выключения пускателя БВВ-K1, выполняющего функцию контактора, подающего напряжение питания на силовую часть тиристорного инвертора.

При нажатии на кнопку ПУСК пульта управления и замкнутых цепях блокировок на выходе выпрямителя появляется испытательное напряжение величиной около 480 В, необходимое для предпускового контроля элементов силовой схемы преобразователя.

БУК — блок управления и контроля. Регулирование мощности, отдаваемой преобразователем нагрузке, обусловлено ее резонансными свойствами. Изменение частоты управляющих импульсов и вместе с ней частоты импульсов выходного тока приводит к изменению мощности нагрузки. Регулирование частоты управляющих импульсов, генерируемых БУК, производится по сигналу задатчика, поступающего с ПУ, либо с внешних устройств (контроллера, дистанционного пульта, регулятора температуры). Функциональная схема БУК приведена на рис. 3.

Кроме формирования управляющих импульсов тиристорного инвертора и регулирования его выходной мощности, БУК обеспечивает предпусковой контроль и пуск преобразователя, отключение от сети при возникновении аварийных режимов, а также распознавание и индикацию аварийных режимов преобразователя. БУК гальванически развязан от силовой схемы трансформатором

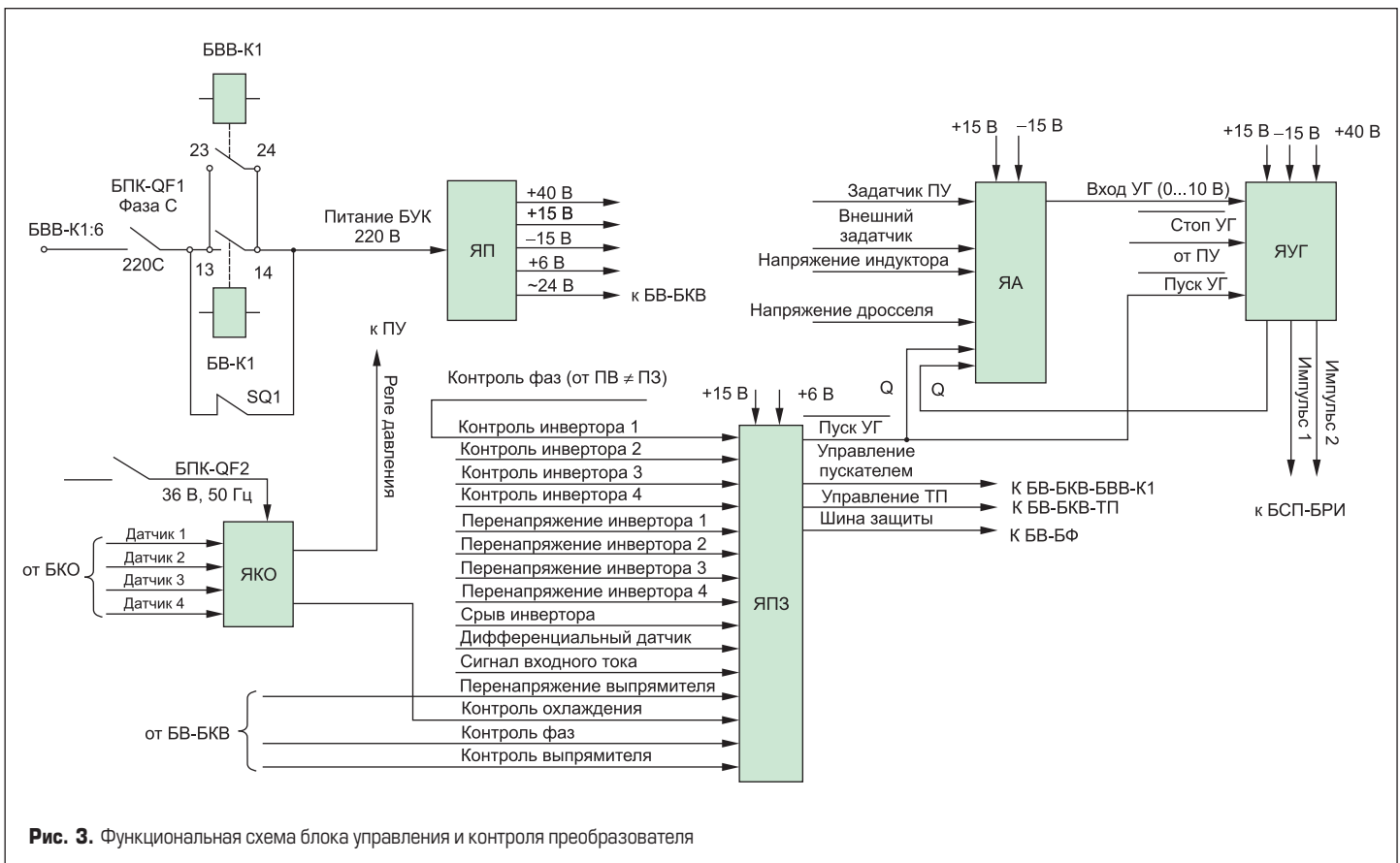


Рис. 3. Функциональная схема блока управления и контроля преобразователя

тока и напряжения, а также электромагнитными реле (пускателями).

ПУН — внешний, выносной пульт управления нагревом. Он предназначен для оперативного управления нагревательной установкой непосредственно с рабочего места оператора. ПУН позволяет включать и выключать силовое питание преобразователя, а также нагрев (кнопка НАГРЕВ и ножная педаль), и регулировать мощность нагрева.

БСП — блок силовой полупроводниковый инвертора. Этот блок представляет собой вентиляционный мост на четырех тиристорах ТБИ 253-100-22, зашунтированный двумя обратными диодами ДЧ 353-800-12-А5. В диагональ моста включены коммутирующий контур и нагрузка. Инвертор состоит из входного дросселя фильтра, коммутирующего дросселя, коммутирующего конденсатора, тиристоров и диодов. Тиристоры включаются управляющими импульсами тока, поступающими от блока распределителя импульсов, предназначенного для размножения импульсов и потенциальной развязки цепей управления тиристоров между собой и с низковольтным выходом БУК.

Схема контроля и защиты преобразователя частоты выполнена по А. с. СССР №1636921 [6]. Принципиальная электрическая схема инвертора, изготовленная согласно патентам РФ №1539938 и №1735988, представляет собой симметричный мостовой резонансный инвертор с закрытым входом и обратными диодами [7, 8]. Кроме того, в преобразователе применены оригинальные технические решения, в которых использованы авторские свидетельства СССР [9–13] и др.

### Конструкция преобразователя и размещение его основных блоков

Преобразователь конструктивно оформлен в виде металлического шкафа с двусторонним обслуживанием через переднюю и заднюю двери, снабженные замками, и защитной блокировкой (рис. 4). Двери соединены с каркасом гибкими перемычками.

Шкаф, установленный на цоколе, имеет штуцеры для охлаждающей воды и окна для

внешних присоединений. В нижней части шкафа установлены входной дроссель и коммутирующие конденсаторы. Выше закреплен блок дросселей, еще выше — БСП. В верхней части шкафа размещены блоки БУК, БПК, БВВ, БВ, на передней двери находится ПУ. На боковых стенках установлены блок контроля охлаждения БКО с реле давления, четырьмя термостатами, четырьмя реле протока и манометром, трансформатор напряжения. В дверных проемах расположены микровы-

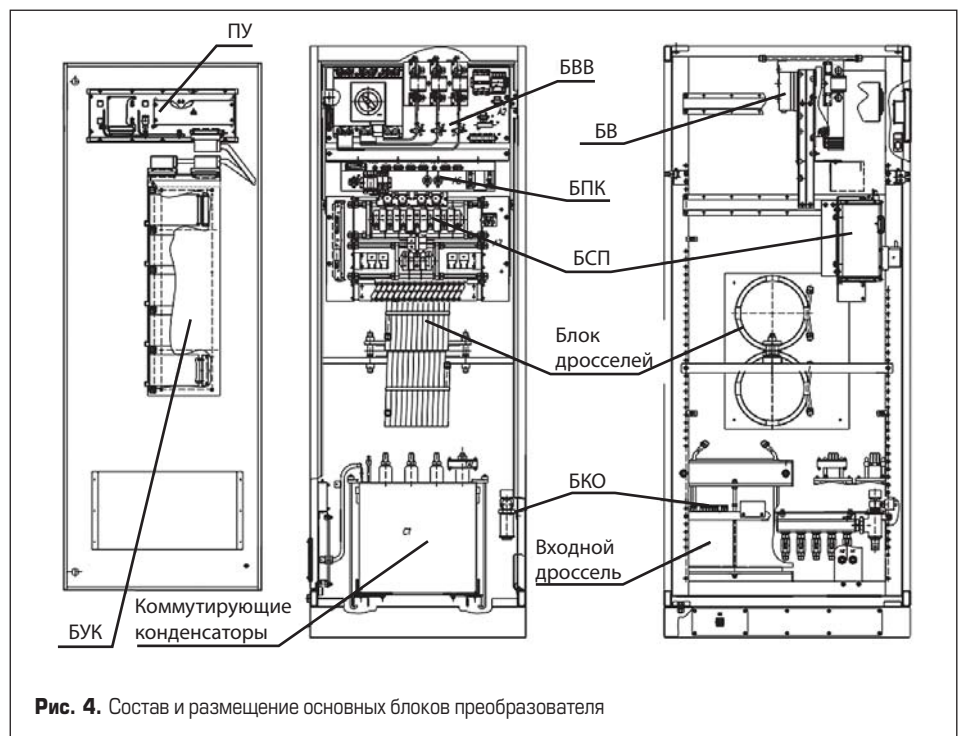


Рис. 4. Состав и размещение основных блоков преобразователя

ключатели блокировки дверей. Для удобства обслуживания в верхней части передней двери и в проеме задней установлены люминесцентные светильники.

Ввод силового питания осуществляется либо через кабельный ввод в крыше шкафа, либо через дно непосредственно на верхние контакты выключателя БВВ-QF1. Левая стена шкафа используется в основном для электрических соединений, правая — для гидравлических соединений.

На передней двери преобразователя размещен пульт управления. На нем расположены приборы контроля входного тока и напряжения, погрешность которых не превышает 2,5%, а также индикатор выходного напряжения инвертора в масштабе 0–10 В, что соответствует 0–100% выходного напряжения.

В инверторе преобразователя имеется дроссель фильтра «с железом», обладающим индуктивностью 2,2 мГн, силовые обмотки которого включены в плюсовую и минусовую шины цепи постоянного тока, блока силового полупроводникового, коммутирующих конденсаторов ЭАПВ-0.8-2.4-4У3 и двух «воздушных» коммутирующих дросселей индуктивностью 40 мкГн. Нагрузка в схеме инвертора отделена от питающей сети конденсаторами. Напряжения на ее выводах симметричны относительно «земли», что обеспечивает защиту инвертора при случайных замыканиях нагрузки на заземленные элементы конструкции.

Пульт управления преобразователем размещен в верхней части передней двери шкафа. Лицевая сторона ПУ разделена на четыре зоны: ВЫПРЯМИТЕЛЬ (вольтметр НАПРЯЖЕНИЕ и амперметр ТОК), ИНВЕРТОР (вольтметр НАПРЯЖЕНИЕ, ручка ЗАДАНИЕ и кнопка НАГРЕВ ВКЛ/ВЫКЛ), зона индикаторов (БЛОКИРОВКА/УСТАНОВКА, БЛОКИРОВКА/ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ОХЛАЖДЕНИЕ, ЗАЩИТА) и зона управления контактором (КОНТАКТОР ВКЛ и КОНТАКТОР ВЫКЛ). Элементы с высоким напряжением с внутренней стороны закрыты изолирующим щитком.

Преобразователь снабжен развитой системой контроля и диагностики, предотвращающей пуск и работу при неисправностях в силовой схеме, а также светодиодными индикаторами неисправностей. Разъем внешнего управления служит для связи с технологическим контроллером либо с выносным пультом управления нагревом. На специальную розетку выведены вход управления мощностью нормированным

сигналом напряжением 0–10 В, вход релейного управления нагревом, цепь включения контактора, цепь «аварийный стоп».

Специальный разъем предназначен для связи с внешними устройствами — станцией охлаждения, приводом наклона печи, блоком компенсации и выключателем нагрева. В отдельные разъемы устанавливаются заглушки и вилки межблочных соединений при работе двух преобразователей общей мощностью 630 кВт. Разъемы устанавливаются внутри шкафа, а на цоколе стоят заглушки с гермовводами, являющиеся неотъемлемыми частями внешних кабелей, связывающих преобразователь с внешними устройствами.

Внешними подключениями преобразователя являются его соединения с питающей сетью, нагрузкой и другими внешними устройствами, входящими в комплекс индукционной установки. Помимо преобразователя, в состав комплекса включены индукционный нагреватель (печь) и блок компенсации. Кроме того, установка может быть оснащена различными коммутационными устройствами, дистанционным (выносным) пультом управления нагревом, станцией охлаждения, различными приводами, измерителями и регуляторами температуры, а также токопроводами, кабелями и электрическими жгутами, связывающими составные части установки. В зависимости от состава индукционной установки внешние подключения могут быть различного исполнения. На рис. 5 показан пульт управления преобразователем.

Контрольные элементы в виде светодиодных индикаторов, установленные на пульте управления (ПУ) преобразователем, а также внутри шкафа преобразователя на лицевых панелях ячеек блока управления и контроля (БУК), предназначены для индикации режимов работы преобразователя, диагностирования его состояния и определения типа и момента наступления неисправности.

Контрольно-измерительные приборы показывают уровни выходного напряжения и тока выпрямителя, осуществляют индикацию выходного напряжения силовой схемы инвертора, а также служат для контроля мощности, потребляемой преобразователем от сети.

БУК представляет собой раму с установленными на ней ячейками, закрепленную на внутренней стороне двери шкафа преобразователя. БУК выполнен на основе печатных плат с лицевыми панелями. Эти платы уста-

навливаются на раме в определенном порядке, согласно нанесенной маркировке.

На лицевые панели ячеек вынесены элементы, необходимые для обслуживания, а именно светодиодные индикаторы, переключатели и подстроечные резисторы. Ячейки БУК электрически связаны между собой жгутом через разъемы. Связь с преобразователем осуществляется через два разъема, закрепленных в верхней части рамы. Ячейки БУК закрыты алюминиевым экраном для защиты их от электромагнитных полей.

Контроль исправного состояния БУК и силовой схемы преобразователя производится при открытой передней двери преобразователя, при этом его силовая схема обесточена. Когда происходит подача питания на силовую схему, микровыключатели дверей фиксируются в нажатом состоянии.

Система охлаждения преобразователя имеет пять параллельных ветвей, в которых охлаждаемые элементы конструкции соединены последовательно. Такое соединение 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. Соединениями являются армированные поливинилхлоридные шланги со специальной оконцовкой.

Соединения шлангов и токопроводов со штуцерами унифицированы, они монтируются с помощью накидных гаек, что упрощает их обслуживание. Подача и слив воды производится через компактный коллектор в нижней части шкафа. В каждой ветви установлен шаровой кран. Если в каналах системы охлаждения нет воды, то после включения питания 36 В/50 Гц загораются соответствующие светодиоды на лицевой панели БУК.

Выходные контакты преобразователя, выполненные в виде штуцеров, предназначены для присоединения водоохлаждаемых токопроводов. Если для соединения с нагрузкой используются неводоохлаждаемые кабели, то для присоединения применяются переходники, а выходные контакты соединяются водяным шлангом. В случае отсоединения индуктора для выравнивания постоянных составляющих напряжения на коммутирующих конденсаторах и разряда внешней батареи компенсирующих конденсаторов служат резисторы, соединяющие выход преобразователя с корпусом.

Блок контроля охлаждения (БКО) предназначен для распределения охлаждающей воды по ветвям охлаждения преобразователя, контроля давления на входе, а также контроля расхода и температуры воды в каждой из ветвей. БКО состоит из напорного и сливного латунных коллекторов, а также из вилки для связи с электрической схемой преобразователя. При монтаже системы охлаждения необходимо установить на ее входе сетчатый фильтр и вентиль.

На напорном коллекторе системы охлаждения установлены реле давления и манометр, а на выходах ветвей охлаждения — шаровые

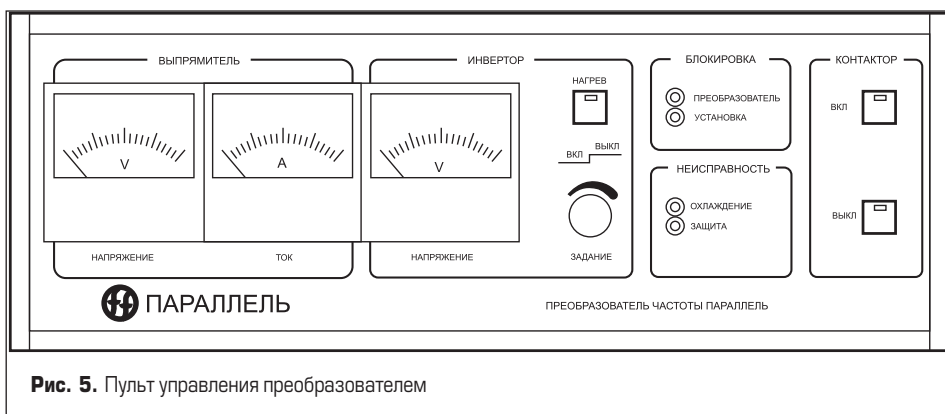


Рис. 5. Пульт управления преобразователем

краны. На каждом из входов в сливной коллектор стоят реле протока и термостат, контакты которых последовательно соединены и при нормальных расходе и температуре воды замкнуты. Если расход воды меньше  $(2,7 \pm 0,3)$  л/мин либо температура ее выше  $45 \pm 5$  °С, цепь контактов разрывается и в соответствующем канале БУК=ЯКО на ПУ и ПУН загораются красные индикаторы ОХЛАЖДЕНИЕ. После времени задержки, определяемого ЯКО, происходит аварийное отключение преобразователя. Если давление в напорном коллекторе меньше величины уставки, равной  $1,5-2$  кгс/см<sup>2</sup>, реле давления отключает силовой контактор.

### Работа тиристорного преобразователя в составе автоматической линии по нагреву труб

Нагревательные установки мощностью до 160 кВт включительно конструктивно выполнены в виде двух блоков — полупроводникового преобразователя частоты со встроенным блоком компенсирующих конденсаторов и индукционного нагревателя, соединенных между собой гибкими водоохлаждаемыми токопроводами. Индукционный нагреватель, как правило, устанавливается в технологическую линию, по которой транспортируются, например с помощью роликов с электроприводом, нагреваемые трубы или прутки. Преобразователь устанавливается в непосредственной близости от нагревателя (на расстоянии до 5 м).

В установках мощностью 250 кВт и выше компенсирующие конденсаторы расположены в отдельном блоке компенсации, который размещается также недалеко от нагревателя, представляющего собой регулируемую станину со сменными индукторами. В ряде случаев индуктор надевается или накладывается на участок трубы, подлежащий нагреву. Конструкцией нагревателя предусмотрена возможность регулировки положения индуктора, для того чтобы обеспечить его соосность с трубой.

На рис. 6 показан преобразователь частоты «Параллель ППЧ-320-2,4», в котором система охлаждения является ответственным узлом конструкции, определяющим его надежность и долговечность.

Управление процессом нагрева производится с панели управления преобразователя частоты либо с внешнего дистанционного пульта. Оператор в начале работы линии нагрева включает питание установки, далее процесс осуществляется автоматически. При подходе трубы к индуктору датчик перемещения включает нагрев (генерацию выходного тока преобразователя частоты), и при этом установка работает на минимальной мощности (единицы киловатт). При входе трубы в индуктор его электрические параметры изменяются, и система управления автоматически устанавливает преобразователь на заданную мощность нагрева. При выходе трубы из индуктора мощность нагрева снижается до минимума, а при остановке ролланга нагрев

прекращается и возобновляется при подаче следующей трубы.

Размещенная в шкафу преобразователя частоты система управления обеспечивает защиту и осуществляет сигнализацию при перегрузках по току и напряжению, срыве инвертора, замыканиях на землю, снижении давления и расхода, при перегреве воды в каналах системы охлаждения, а также при открывании дверей (внутренняя блокировка), неготовности внешнего оборудования (при внешней блокировке), пропадании фазы питающего напряжения и при возникновении неисправностей силовых полупроводниковых приборов.

Состав элементов на лицевой панели внешнего пульта управления нагревом (ПУН) показан на рис. 7. Пульта управления нагревом ПАРАЛЛЕЛЬ ПУН разработаны для установок различного типа. В их состав могут входить различные измерительные и регулирующие приборы — измерители

и индикаторы напряжения, микропроцессорные регуляторы температуры, реле времени (таймеры), регистраторы параметров техпроцесса.

Светодиодные индикаторы ПУН отображают подачу питающего напряжения, включение контактора (пускателя) и неисправности в системе охлаждения. Кроме того, они фиксируют срабатывание электронной защиты. Розетка ПЕДАЛЬ служит для подключения педали либо другого релейного управляющего устройства с контактным выходом. Во включенном положении кнопки НАГРЕВ при размыкании цепи розетки ПЕДАЛЬ на индукторе появляется напряжение высокой частоты, величина которого задается положением ручки задания напряжения индуктора. Одновременно оператор видит изменение величины этого напряжения по индикатору НАПРЯЖЕНИЕ ИНДУКТОРА, 10 В шкалы которого соответствует номинальному напряжению на индукторе. В положении ВЫКЛ кнопка НАГРЕВ снимает напря-



Рис. 6. Монтаж системы охлаждения преобразователя частоты



Рис. 7. Выносной пульт управления нагревом

жение с индуктора. При этом состояние цепи ПЕДАЛЬ не имеет значения.

Ручка задания напряжения индуктора на ПУН работает только в режиме внешнего задания, когда переключатель ЗАДАНИЕ на лицевой панели БУК-ЯА переведен в положение ВНЕШ. В противном случае управление мощностью ведется преобразователем от ручки ПУ. Управление нагревом от ПУН возможно лишь при нажатой кнопке НАГРЕВ основного ПУ преобразователя.

Пульты выполнены в защищенном металлическом корпусе настенного крепления, напряжение питания — 36 В/50 Гц. На передней панели размещены индикаторы, кнопки включения и выключения силового питания, кнопка-табло НАГРЕВ, ручка ЗАДАНИЕ, пьезоизлучатель — аварийная сирена, розетка ПЕДАЛЬ, измеритель-регулятор температуры, таймер задания времени нагре-

ва. Пульт устанавливается в удобном для оператора месте и соединяется с преобразователем ПАРАЛЛЕЛЬ ППЧ специальным кабелем. На пульте имеются контакты для подключения маяка-лампы аварийной сигнализации.

В зависимости от требований, предъявляемых к индукционной установке, конструкция и функции ПУН могут изменяться. При параллельной работе двух преобразователей на общую нагрузку в составе преобразователя мощностью 500 кВт используется ПУН специального типа, управляющий параллельной работой двух преобразователей мощностью 250 кВт. Конструктивная унификация обеспечивает взаимозаменяемость однотипных элементов, узлов, блоков, ячеек.

На рис. 8 приведена автоматическая линия для высокочастотного нагрева трубы в индук-

ционном нагревателе — индукторе методического действия. Нагрев трубы производится для нанесения изолирующего и защитного покрытия.

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

Преобразователь частоты «Параллель ППЧ-320-2,4 УХЛ4» подключен к параллельному контуру нагрузки. Выходное напряжение преобразователя и мощность нагрузки (на индукторе) показывает измерительный прибор, расположенный на выносном пульте управления нагревом. Нагрев трубы происходит в многвитковом индукторе электромагнитным полем повышенной частоты 2,4 кГц. Индуктор подключен к батарее из двух параллельно подключенных компенсирующих печных конденсаторов типа ЭЭПВ-0,8-2,4-4У3 емкостью 88 мкФ. Подключение параллельного контура нагрузки, в котором на рабочей частоте поддерживается резонанс токов, осуществляется медными водоохлаждаемыми токопроводами.

Регулирование мощности производится вручную задатчиком ПУ (ПУН) либо автоматически от внешнего регулятора или контроллера с управляющим сигналом 0–10 В постоянного тока. Релейное управление мощностью осуществляется с помощью педали, кнопки, тумблера, реле или технологическим регулятором температуры с релейным выходом. Преобразователь обеспечивает регулирование среднего напряжения нагрузки или другого технологического параметра (температуры).

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 следующие режимы 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 задатчика на ПУ (переключатель БУК=ЯУ в положении ВНУТРЕННЕЕ), так и от внешних устройств — ПУН, контроллер, регулятор температуры (переключатель БУК=ЯА в этом случае должен находиться в положении ВНЕШНЕЕ).

Основными режимами работы индукционной установки являются режимы



Рис. 8. Автоматическая линия нагрева трубы большого диаметра

ВЫКЛЮЧЕНО, ОЖИДАНИЕ и НАГРЕВ. Дополнительный режим ПРОВЕРКА служит для контроля цепей управления преобразователя при отключенном питании его силовой схемы.

В режиме ВЫКЛЮЧЕНО силовая схема преобразователя обесточена, на ПУ преобразователя светится кнопка КОНТАКТОР ВЫКЛ. В случае открывания дверей горит светодиод БЛОКИРОВКА, а при отсутствии давления воды в системе охлаждения — светодиод ОХЛАЖДЕНИЕ. Для обесточивания схемы необходимо выключить выключатель QF1 преобразователя, а для снятия напряжения с входных контактов изделия — отключить внешний рубильник. В режиме ВЫКЛЮЧЕНО преобразователь находится во время длительных перерывов в работе, когда оператор отсутствует.

Режим ОЖИДАНИЕ наступает при внутреннем управлении после нажатия кнопки КОНТАКТОР ВКЛ на ПУ либо кнопки ВКЛ на ПУН, а при внешнем управлении — когда по цепи «Контактор включить» поступает команда контроллеру.

В первом случае хотя бы один из выключателей нагрева должен быть замкнут — либо кнопка НАГРЕВ на ПУ, либо кнопка НАГРЕВ на ПУН. Во втором случае нагрев может быть выключен также и по цепи внешнего контроллера «Нагрев включить». Если в розетку ПЕДАЛЬ ПУН включена ножная педаль управления нагревом, то до нажатия педали режим ОЖИДАНИЕ сохраняется даже после включения обоих упомянутых выключателей нагрева. Режим ОЖИДАНИЕ предназначен для установки и смены нагреваемой детали в индукторе, а также для тех случаев, когда возникает небольшой перерыв в работе, но оператор находится на рабочем месте.

Режим НАГРЕВ — основной технологический режим — наступает после нажатия кнопки НАГРЕВ на ПУ, перевода кнопки ПУН НАГРЕВ в положение ВКЛ и нажатия на педаль (при ее наличии). При отсутствии педали функция управления нагревом выполняет кнопка НАГРЕВ ВКЛ/ВЫКЛ. В режиме НАГРЕВ изделие генерирует ТВЧ, индуктор находится под напряжением, а на ПУН горит светодиод НАГРЕВ. Величина мощности регулируется задатчиком напряжения индуктора на ПУ либо — при внешнем управлении — сигналом задания от технологического контроллера или от ПУН.

Переключатель МОЩНОСТЬ — ЧАСТОТА на лицевой панели БУК=ЯА превращает ручку задания напряжения на ПУ или ПУН в задатчик частоты. Переключатель ЗАДАНИЕ ВНУТР/ВНЕШ может вместо задатчика на ПУ подключить к системе управления сигнал постоянного тока напряжением 0...10 В от задатчика ПУН либо от внешнего устройства (технологического контроллера или регулятора). Переключатель АВТОСТОП на лицевой панели ЯУТ БУК обеспечивает автоматическое прекращение генерации ТВЧ при снижении сигнала задания частоты или мощности ниже 0,5 В.

В режиме ПРОВЕРКА преобразователь находится при открытой передней двери. В этом

режиме подача питания на силовую схему исключается, а все ячейки блока управления и контроля находятся под номинальным напряжением, что позволяет осуществить их проверку, в частности наблюдать параметры управляющих импульсов, поступающих на тиристоры инвертора. Диагностику неисправностей преобразователя и линии нагрева труб показывают светодиодные индикаторы пульта управления преобразователем и его блока управления и контроля.

\* \* \*

Прогресс в разработке изделий силовой электроники, в первую очередь, обеспечивается совершенствованием параметров силовых компонентов — транзисторов, тиристоров и диодов, которые постоянно улучшаются. В настоящее время отечественной промышленностью освоены мощные тиристоры ТБИ, высокочастотные IGBT-транзисторы, высоковольтные диоды ДЧ и другие компоненты силовой электроники, необходимые при конструировании полупроводниковых преобразователей повышенной частоты для установок индукционного нагрева металлов.

Качество проектирования статических преобразователей частоты во многом определяет система водяного охлаждения, в которой широко применяются специальные станции охлаждения. Проектированию системы водоохлаждения мощных преобразователей следует уделить значительное внимание, так как она во многом определяет их надежность и долговечность.

## Литература

1. Щука А. А. Электроника. Учеб. пособие / Под ред. проф. А. С. Сигова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 800 с.
2. Головин Г. И. Пионер высокочастотной техники. Жизнь и деятельность В. П. Вологодина. — М.: Связь, 1970.
3. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. Ч. 1. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999.
4. Зинин Ю., Мульменко М. Новые разработки силовых преобразователей типа «Параллель» для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2014. № 2.
5. [www.prl.ru](http://www.prl.ru).
6. А. с. СССР № 1636921. Устройство для контроля и защиты вентильного преобразователя.
7. Пат. РФ № 1539938 Инвертор.
8. Пат. РФ № 1735988 Инвертор.
9. А. с. СССР № 851700 Преобразователь частоты.
10. А. с. СССР № 748727 Способ регулирования электрических параметров преобразователя частоты с резонансной нагрузкой.
11. А. с. СССР № 1095304 Способ защиты инвертора.
12. А. с. СССР № 1184042 Устройство для защиты инвертора.
13. А. с. СССР № 1543512 Преобразователь частоты с блоком конденсаторной защиты.