

# Конструкция основных узлов и силовых блоков

## тиристорных преобразователей частоты типа ПАРАЛЛЕЛЬ

**В статье описаны назначение, состав, устройство, работа и особенности конструкции полупроводникового преобразователя частоты (ППЧ) ПАРАЛЛЕЛЬ мощностью 320 кВт и частотой 2,4 кГц, разработанного для электропитания установок индукционного нагрева токами высокой частоты (ТВЧ).**

**Рассмотренные основные узлы ППЧ — дроссель постоянного тока, коммутирующие дроссели, блок силовых вентилях и электротермические конденсаторы — определяют вес, габариты и, в итоге, стоимость современных преобразователей частоты.**

**В устройствах ПАРАЛЛЕЛЬ широко используются унифицированные узлы и силовые блоки, что позволяет сократить сроки проектирования новых ППЧ различной частоты и мощности для питания электротермических установок ТВЧ.**

Юрий Зинин

umz42@mail.ru

Дарья Мамаева

darya.mamaeva.95@mail.ru

Михаил Мультенко

### Введение

Полупроводниковый преобразователь частоты ПАРАЛЛЕЛЬ мощностью 320 кВт с выходной частотой 2,4 кГц предназначен для питания индукционных электротермических установок и управления электрическими режимами индукционных нагревателей, применяемых в различных электротехнологических процессах индукционного нагрева металлов с однофазным напряжением питания током повышенной частоты (2,4 кГц) напряжением до 800 В.

Статические полупроводниковые преобразователи частоты обеспечивают бесконтактное регулирование напряжения или мощности в индукторе с целью управления температурой нагрева обрабатываемого изделия при сохранении достаточно высокого КПД [1, 2].

Улучшение характеристик ППЧ достигается повышением эффективности использования силовых диодов, тиристоров, силовых конденсаторов и катушек индуктивности, благодаря применению методов схемотехнического моделирования и PSpice-моделей названных компонентов. Критерии эффективного использования силовых элементов тиристорных автономных инверторов при реновации рассмотрены в работе [3].

Основные характеристики современного тиристорного преобразователя частоты ППЧ-320-2.4 приведены ниже.

- ППЧ подключается к сети переменного трехфазного тока с глухозаземленной нейтралью частотой 50 (60) Гц и номинальным напряжением  $3 \times 380 \text{ В} \pm 10\%$ .
- Фазный ток питающей сети (действующее значение) — не более 550 А.

- Напряжение на выходных контактах ППЧ, для подключения токопровода нагрузки, при работе на индукционный нагреватель с батареей компенсирующих конденсаторов — 200–800 В.
- Регулируемая выходная частота — 2–2,4 кГц.
- Номинальная мощность на выходе — 320 кВт.
- Электрический КПД — 0,94.
- Номинальный ток на выходе (действующее значение) — 670 А.
- Масса преобразователя — 700 кг.
- Габариты шкафа с рым-болтами — 700×800×1956 мм.
- Минимальный срок службы — 10 лет.

### Устройство и работа ППЧ-320-2.4

Полупроводниковые преобразователи предназначены для преобразования энергии промышленной трехфазной сети частотой 50 Гц в однофазный ток высокой частоты — 2–2,4 кГц, который, настроенный на номинальную частоту, питает нагрузочный колебательный контур установки индукционного нагрева. Колебательный контур нагрузки инвертора состоит из индуктора и блока параллельных конденсаторов, компенсирующих реактивную мощность индуктора. Напряжение индуктора регулируется изменением рабочей частоты ППЧ, что позволяет управлять температурой нагрева металла заготовки, помещаемой в индуктор [4].

На рис. 1 представлена функциональная схема тиристорного преобразователя ПАРАЛЛЕЛЬ ППЧ-320-2.4.

Далее в тексте приведены следующие сокращения:

- БВВ — блок ввода;
- БВ — блок выпрямителя;

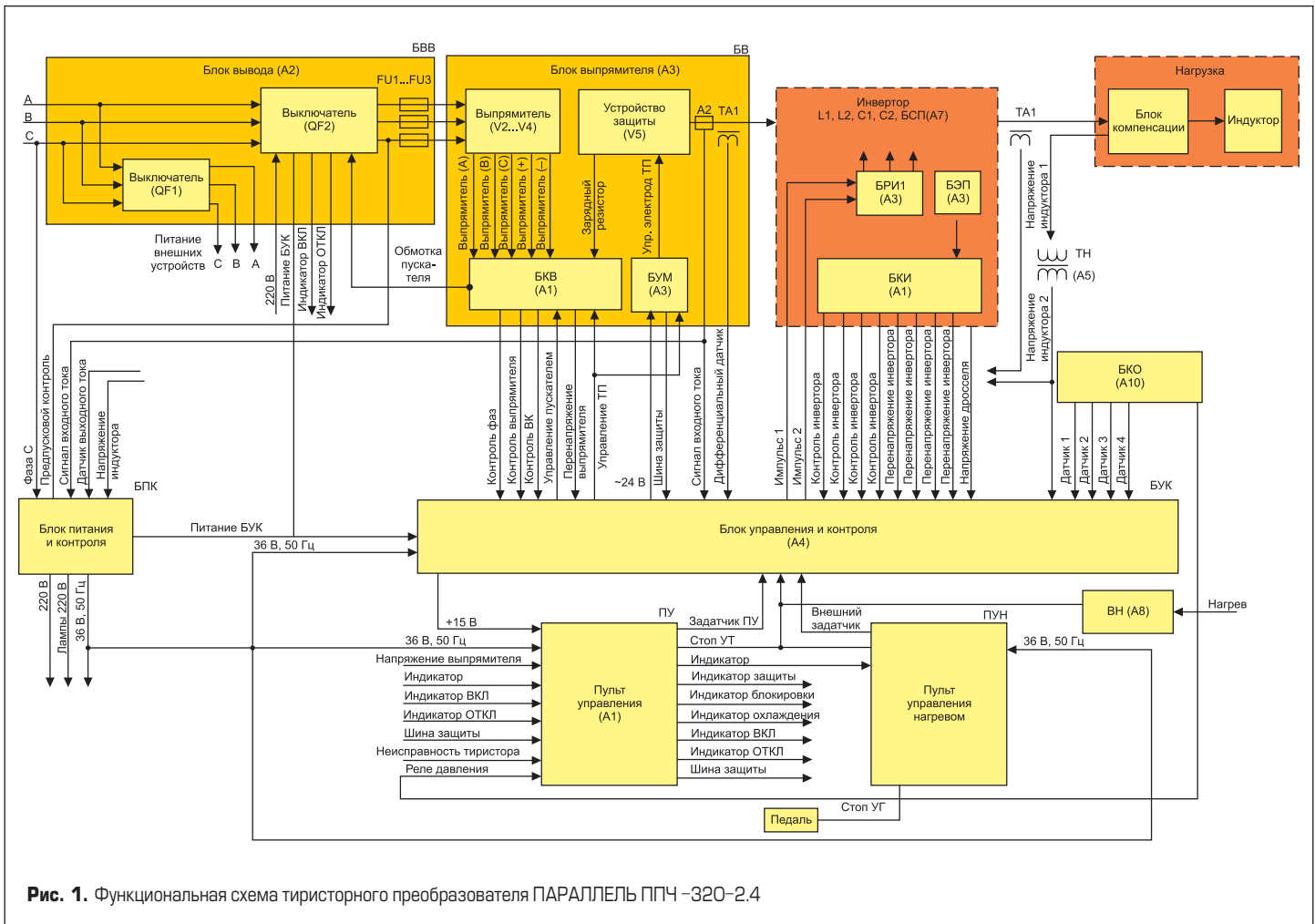


Рис. 1. Функциональная схема тиристорного преобразователя ПАРАЛЛЕЛЬ ППЧ-320-2.4

- БДЦ — блок демпфирующих цепей;
- БКВ — блок контроля выпрямителя;
- БКИ — блок контроля инвертора;
- БКО — блок контроля охлаждения;
- БПК — блок питания и контроля;
- БРИ — блок распределителя импульсов;
- БСП — блок силовой полупроводниковый;
- БУК — блок управления и контроля;
- БУМ — блок управления модулем;
- БЗП — блок защиты от перенапряжений;
- ПУ — пульт управления;
- ПУН — пульт управления нагревом;
- ТН — трансформатор напряжения;
- ТП — транзистор проходной.

Эта схема (рис. 1) помогает понять принцип действия тиристорного преобразователя частоты. Функциональная схема ППЧ содержит такие конструктивно обособленные устройства, как БВВ, БВ, БСП, ряд элементов силовой схемы, БПК, элементы цепей контроля и управления, БУК, БКО, ПУ, ПУН и ВН. Сетевое напряжение 380 В частотой 50 Гц через БВВ поступает в БВ. Блок ввода состоит из автоматических выключателей QF1, QF2, пускателя K1 и быстродействующих предохранителей FU1–FU3. Между выключателем QF2 и предохранителями FU1–FU3 содержатся помехоподавляющие конденсаторы C1–C3 с разрядными резисторами R1–R3. Выключатель QF1 служит для защиты цепей питания внешних устройств преобразователя (станций охлаждения, электроприводов и т. д.). Цепи питания внешних устройств, а также управления и контроля выведены на розетку.

На рис. 2 показана конструкция блока ввода (BВВ) питания ППЧ.

В ППЧ ПАРАЛЛЕЛЬ для выпрямления сетевого напряжения и питания автономного инвертора используются неуправляемый блок мостового выпрямителя и встроенный бесконтактный конденсаторный выключатель. Блок выпрямителя БВ выполнен по трехфазной мостовой схеме на силовых полупроводниковых модулях V2–V4. В цепь постоянного тока включены проходной транзистор IGBT-модуль V5 со встроенным обратным диодом, датчик тока, измерительный шунт RS1 и дифференциальный трансформатор тока TA1. Проходной транзистор (ТП) V5 выполняет

функцию силового ключа, соединяющего выпрямитель с инвертором. Он снабжен демпфирующей цепью — снаббером A2, состоящим из конденсатора C1, диода V1, варистора RU1 и резисторов R1, R2.

Переменное трехфазное напряжение 380 В частотой 50 Гц через БВВ подается в БВ, где выпрямителем преобразуется в постоянное напряжение величиной 520 В, которое через устройство бесконтактной защиты поступает на вход инвертора.

Схема и принцип действия инвертора рассмотрены ниже. Инвертор преобразует постоянное напряжение 520 В в импульсы выходного тока, частота следования которых равна частоте управляющих импульсов, поступающих на тиристоры инвертора с БУК. Импульсы выходного тока положительной и отрицательной полярности, по форме близкие к синусоидальным, возбуждают в нагрузочном колебательном контуре колебания тока и напряжения. Контур нагрузки настроен на частоту импульсов выходного тока инвертора. Регулирование мощности, отдаваемой нагрузке, основано на ее резонансных свойствах. Изменение частоты управляющих импульсов и вместе с ней частоты импульсов выходного тока приводит к изменению мощности, выделяемой в нагрузке.

Изменение частоты управляющих импульсов БУК производится по сигналу датчика, поступающему с ПУ либо с внешних устройств (контроллера, дистанционного пульта, регулятора температуры). Помимо генерации управляющих

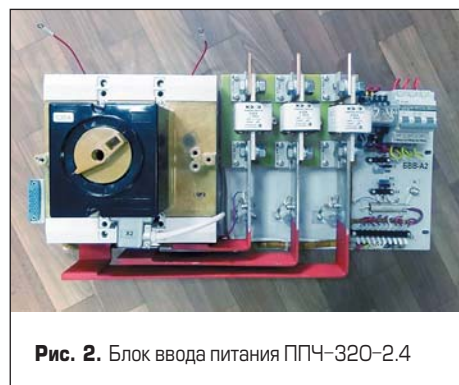


Рис. 2. Блок ввода питания ППЧ-320-2.4

импульсов и регулирования выходной мощности, БУК обеспечивает предпусковой контроль и пуск изделия, отключение с помощью устройства защиты от сети при возникновении аварийных режимов, а также распознавание и индикацию типа аварийного режима светодиодами индикаторами. Связь БУК с силовой схемой и одновременно гальваническую развязку осуществляют БКВ, БКИ, БРИ, трансформаторы тока и напряжения, электромагнитные реле.

ППЧ имеет электрическую защиту, отключающую силовое питание при недопустимых перегрузках по току, перенапряжениях на силовых полупроводниковых приборах, снижении давления или перегреве охлаждающей воды, размыкании цепей внешней блокировки, замыкании индуктора на «землю». Преобразователь снабжен развитой системой контроля и диагностики, предотвращающей пуск и работу ППЧ при возникновении неисправностей.

Устройством защиты, которое входит в состав БВ, представляет собой проходной транзистор ТП (IGBT-модуль), обеспечивающий подачу напряжения 520 В на вход инвертора при его пуске и для отключения от выпрямителя при наступлении аварийного режима, когда с выхода БУК по цепи «управление ТП» поступает соответствующий сигнал.

ТП включается после предпускового контроля при подаче в его управляющую цепь через блок управления модулем БУМ сигнала постоянного напряжения величиной около 15 В по цепи «Управление ТП» от БУК. В момент срабатывания защиты прекращается подача постоянного напряжения управления на ТП, в результате чего ТП выключается. При этом ток в проходном транзисторе ТП прерывается, ток входного дросселя инвертора перехватывается диодом и снижается до нуля.

После выключения диода к выпрямительному мосту V2–V4 через обратный диод ТП при-

кладывается напряжение со стороны инвертора, которое ограничивается RC-цепью и варистором. К выходу выпрямителя подключены две RC-цепочки, которые в режиме предпускового контроля вместе с диодами модулей V2–V4 образуют схему выпрямителя с удвоением напряжения, входом которой являются цепи «Фаза С» и «Фаза N». При нажатии на кнопку «ПУСК» ПУ и замкнутых цепях блокировок на выходе выпрямителя появляется испытательное напряжение величиной около 480 В, необходимое для предпускового контроля элементов силовой схемы ППЧ.

БКВ обеспечивает предпусковой и непрерывный функциональный контроль силовой схемы БВ, а также гальваническую развязку БВ с цепями управления. Состояние диодов выпрямителя и ТП контролируется транзисторными оптопарами, подключенными к соответствующим полупроводниковым приборам через балластные резисторы. Наличие фазных напряжений на входе выпрямителя контролируют оптопары с токоограничивающими элементами.

На входах оптопар в качестве фильтров среднего значения включены конденсаторы, сглаживающие входной ток. Для защиты от перенапряжений на выпрямителе предназначен варистор RU1 с каналом контроля перенапряжений. При перенапряжениях достаточной длительности ток варистора RU1 заряжает конденсаторы, в результате чего происходит аварийное отключение ППЧ с индикацией канала защиты «Перенапряжения выпрямителя». Твердотельное реле А1 служит для включения промежуточного реле БВВ-К1 после предпускового контроля изделия по сигналу цепи «Управление пускателем», поступающему от БУК. Для связи БКВ с силовой схемой ППЧ служит вилка, для связи с низковольтными цепями — розетка.

Авторские права на использование основных технических решений ППЧ-320-2.4 защищены

А. с. СССР № 851700 «Преобразователь частоты», А. с. СССР № 748727 «Способ регулирования электрических параметров преобразователя частоты с резонансной нагрузкой», А. с. СССР № 1095304 «Способ защиты инвертора», А. с. СССР № 1184042 «Устройство для защиты инвертора», А. с. СССР № 1636921 «Устройство для контроля и защиты вентильного преобразователя», А. с. СССР № 1543512 «Преобразователь частоты с блоком конденсаторной защиты» и др.

В преобразователе использованы технические решения в соответствии с патентами РФ на изобретение № 1539938 «Инвертор» и № 1735988 «Инвертор». (Схема контроля и защиты преобразователя частоты выполнена по А. с. СССР № 1636921.)

### Схема и принцип действия мостового тиристорного инвертора с обратным диодом

На рис. 3 представлены упрощенная принципиальная схема автономного тиристорного мостового инвертора с закрытым входом и эквивалентные схемы, отражающие его структуру на интервалах между коммутациями тиристоров и диода. Показан мостовой инвертор, состоящий из входного дросселя фильтра  $L_d$ , коммутирующего дросселя  $L_k$ , коммутирующего конденсатора  $C_k$ , тиристоров VS1–VS4, встречно-параллельного диода VD1 и эквивалентной нагрузки.

На функциональной схеме ППЧ обозначены входной дроссель L1, коммутирующие конденсаторы C1, C2, коммутирующие дроссели блока L2. Тиристоры VS1–VS4 и диод VD1 входят в блок БСП, диодная группа которого VD1, VD2 представлена диодом VD1. Нагрузка инвертора изображена в виде активного сопротивления  $R_3$ , представляющего собой эквивалентное сопротивление колебательного контура индукционной нагрузки на резонансной частоте.

На рис. 4 приведены временные диаграммы электромагнитных процессов в тиристорном мостовом инверторе с закрытым входом и обратными диодами.

От системы управления ППЧ на тиристоры противоположных плеч моста инвертора поочередно поступают импульсы тока управления, включающие ту или иную диагональ моста (VS1, VS4 или VS2, VS3). Установившийся режим характерен тем, что токи и напряжения в каждом периоде совпадают. Если до момента  $t_0$  проводят ток тиристоры VS2, VS3, входной ток, сглаженный дросселем  $L_d$ , протекает по цепи  $L_d$ –VS3– $R_3$ – $C_k$ – $L_k$ –VS2, вызывая рост напряжения на коммутирующем конденсаторе  $C_k$ , полярность которого показана на рис. 3.

В момент  $t_0$  от системы управления инвертором поступают импульсы, включающие тиристоры противофазной диагонали моста VS1, VS4, и начинается колебательный перезаряд конденсатора  $C_k$  через нагрузку с эквивалентными сопротивлением  $R_3$  и индуктивностью  $L_k$ , а также одновременно по двум контурам, первый из которых образован тиристорами VS3 и VS1, а второй — тиристорами VS4 и VS2.

В момент  $t_1$  величина тока нагрузки превышает величину входного тока, протекающего через

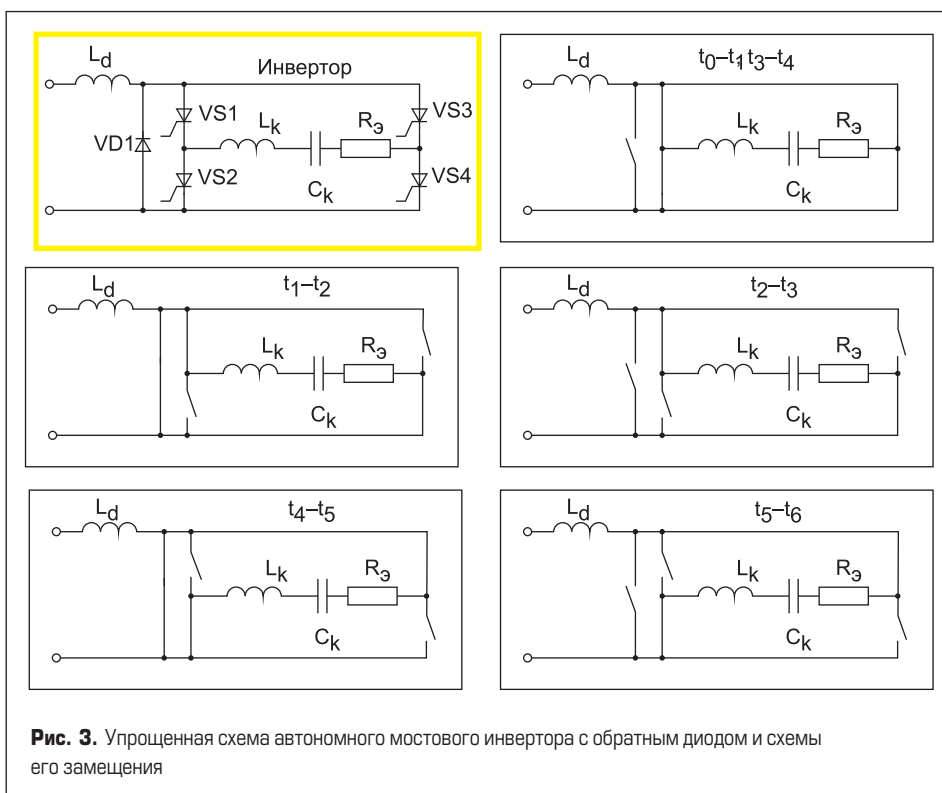


Рис. 3. Упрощенная схема автономного мостового инвертора с обратным диодом и его замещения

тиристоры VS2, VS3, и на интервале  $t_1-t_2$  ток нагрузки (ток перезаряда конденсатора) протекает по обратному диоду VD1. На интервале  $t_1-t_2$  к тиристорам VS2, VS3 приложено обратное напряжение, равное падению напряжения на проводящих тиристорах VS1, VS2 и обратном диоде VD1. Этот интервал времени предоставляется на восстановление запирающих свойств выключившимся тиристорам VS2, VS3.

В момент  $t_2$  диод VD1 выключается, и в течение интервала  $t_2-t_3$  в проводящем состоянии остаются только тиристоры VS1, VS4, через которые входной ток заряжает конденсатор  $C_k$  напряжением обратной полярности. Заряд конденсатора  $C_k$  током дросселя  $L_d$  восполняет энергию, рассеянную нагрузкой во время перезаряда конденсатора  $C_k$ . На интервале  $t_2-t_3$  к тиристорам выключенных плеч моста приложено прямое напряжение, равное сумме напряжений на коммутирующем конденсаторе и нагрузке. Максимальное значение этого напряжения в 2-3 раза больше, чем напряжения питания.

В момент  $t_3$  включаются тиристоры VS2, VS3 и начинается формирование второго полупериода выходного тока. При этом происходит обратный перезаряд коммутирующего конденсатора на интервале  $t_3-t_4$  по контурам  $L_k-VS1-VS3-R_3$  и  $L_k-VS2-VS4-R_3$ , а на интервале  $t_4-t_5$  — по контуру  $-VS3-R_3-L_k-VS2-VD1$ . В момент  $t_5$  диод VD1 выключается и включенными остаются лишь тиристоры VS2, VS3, через которые конденсатор  $C_k$  дозарядается напряжением полярности, указанной на рис. 3. В момент  $t_6$  заканчивается формирование периода выходного тока, далее описанные процессы периодически повторяются.

Переходные режимы работы инвертора, когда значения токов и напряжений меняются от полупериода к полупериоду, наблюдаются при пуске, отключении питания, останове (прекращении подачи управляющих импульсов), регулировании частоты и мощности, а также при внезапном изменении параметров нагрузки. Все нормальные режимы, как переходные, так и стационарные, характеризуются рассмотренной выше повторяемостью чередования интервалов проводимости и пауз в работе тиристоров и диода. Это свойство использовано для диагностики нормальной работы инвертора и фиксации повреждений — срывов инвертирования и коротких замыканий. Анализ установившихся электромагнитных процессов в инверторе подробно рассмотрен в работах [5-9].

**Состав и размещение основных блоков преобразователя ППЧ ПАРАЛЛЕЛЬ-320-2,4 УХЛ4**

На рис. 5 показано размещение основных узлов и силовых блоков тиристорного преобразователя частоты ПАРАЛЛЕЛЬ ППЧ-320-2.4.

Преобразователь ПАРАЛЛЕЛЬ конструктивно выполнен в виде металлического шкафа со стойкой и двусторонним обслуживанием через переднюю и заднюю двери, снабженные замками и защитной блокировкой. Двери соединены с каркасом гибкими перемычками. Шкаф ППЧ установлен на цоколе со штуцерами для подвода и слива охлаждающей воды

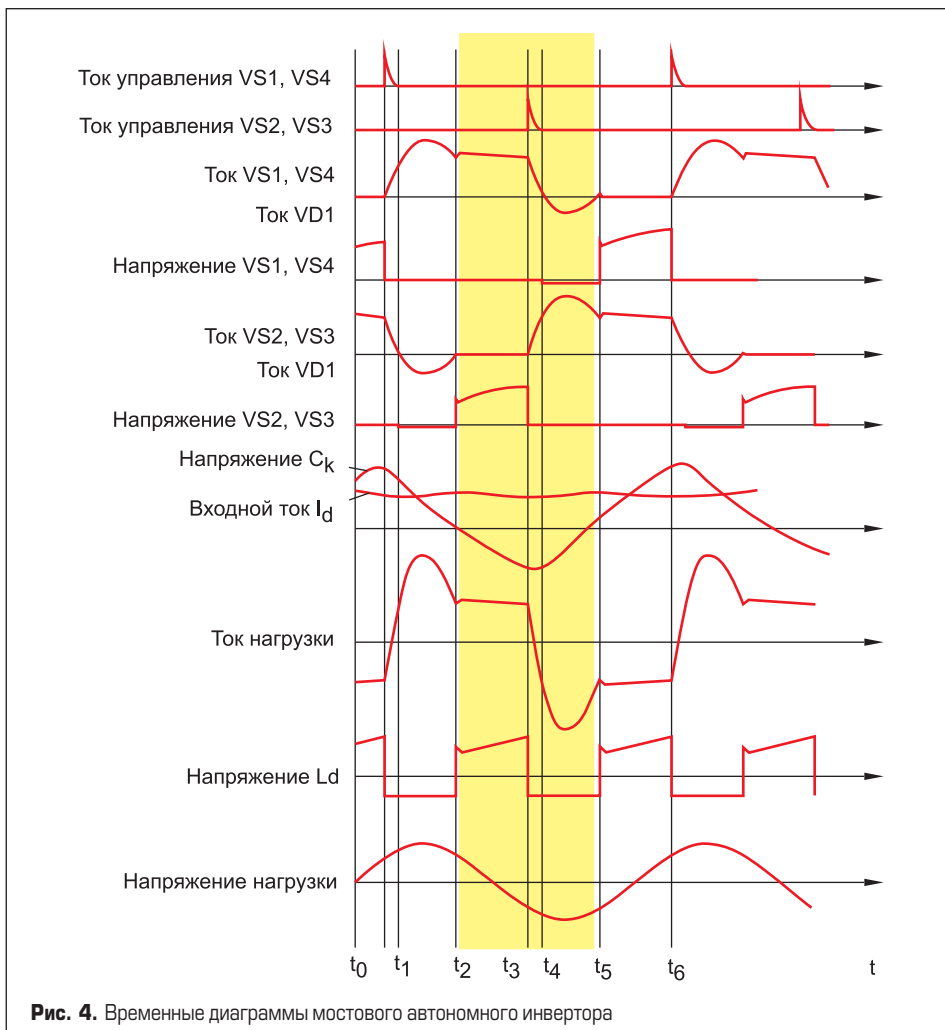


Рис. 4. Временные диаграммы мостового автономного инвертора

с окнами 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 БУК, БПК, БВВ, БВ, на передней двери — ПУ. На боковых стенках установлены блок контроля охлажде-

ния БКО с реле давления, термостатами, реле протока воды и манометром, трансформатором напряжения, в дверных проемах размещены микровыключатели блокировок ППЧ. В верхней части передней двери и в проеме задней двери установлены светильники для подсветки при обслуживании преобразователя.

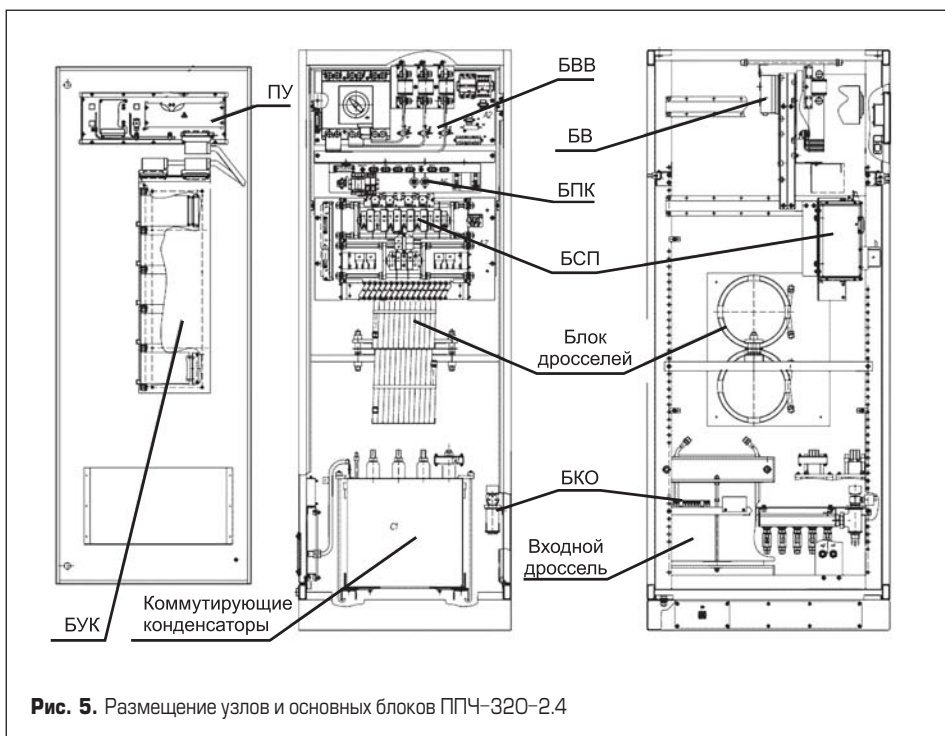


Рис. 5. Размещение узлов и основных блоков ППЧ-320-2.4

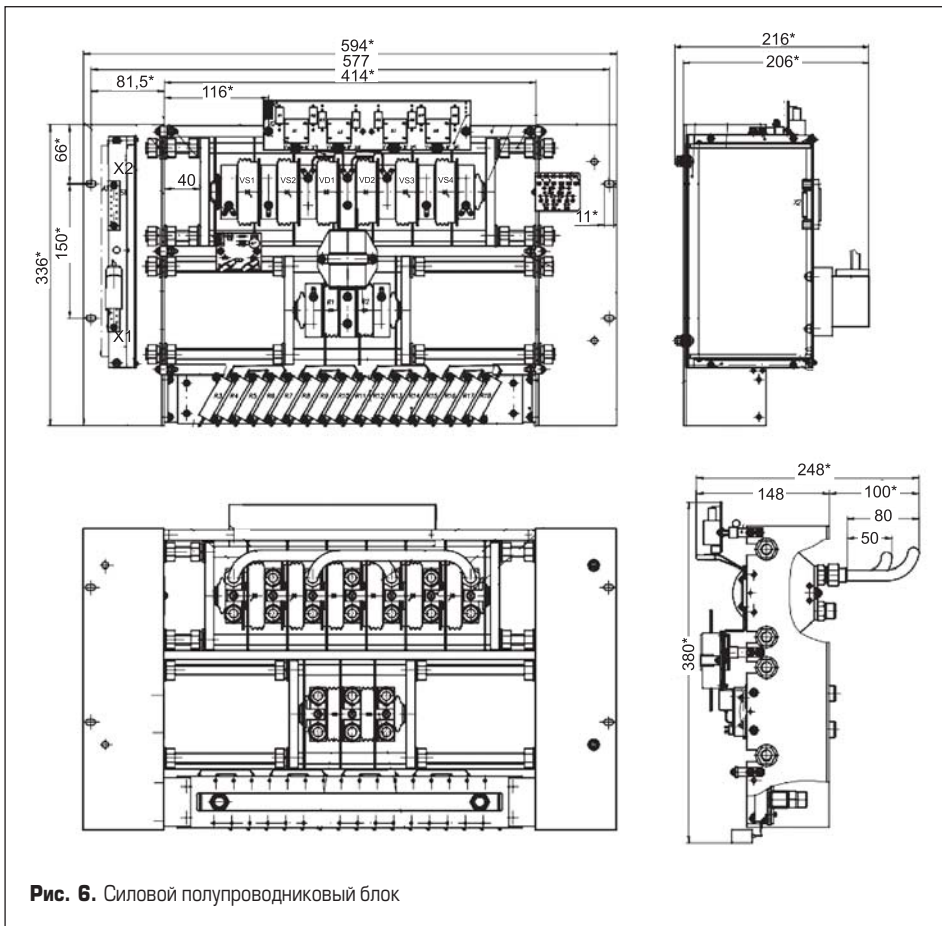


Рис. 6. Силовой полупроводниковый блок

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

БУК сделан в виде рамы с установленными на ней ячейками, которая крепится на внутренней стороне двери шкафа преобразователя. Ячейки БУК выполнены на печатных платах с лицевыми панелями. На лицевых панелях расположены элементы, необходимые для обслуживания: светодиодные индикаторы, переключатели, подстроечные резисторы. Ячейки БУК через электрические разъемы связаны жгутом, а связь с ППЧ осуществляется через

два разъема, закрепленных в верхней части рамы. Для защиты от электромагнитных полей ячейки БУК закрыты экраном из листового алюминия.

Подробное описание одного из вариантов конструкции, а также основных функций специализированных ячеек блока управления и контроля тиристорных ППЧ пятого поколения ПАРАЛЛЕЛЬ приведено в работе [10].

### Блок силовых приборов для ПАРАЛЛЕЛЬ ППЧ 320-2,4 УХЛ4

На рис. 6 представлен общий вид и габаритные размеры блока силового (БС) для преобразователя частоты ПАРАЛЛЕЛЬ ППЧ 320-2,4 УХЛ4.

Рассмотрим конструкцию полупроводникового узла ППЧ — силового полупроводникового блока — и назначение отдельных компонентов. Выпрямленное напряжение 520 В через силовые обмотки дросселя входного  $L_d$  подается в БСП. К выходным контактам БСП подключены коммутирующие дроссели  $L_1, L_2$  и коммутирующие конденсаторы  $C_1, C_2$ , в цепь которых включены контакты  $H_1, H_2$  для присоединения к нагрузке.

БСП представляет собой вентильный мост на тиристорах  $VS_1-VS_4$ , шунтированный обратными диодами  $VD_1, VD_2$ . Выводы 1, 4 моста служат для подключения плюсового вывода источника постоянного тока, выводы 3, 6 — для минусового вывода, выводы 2, 5 — для подключения цепи коммутирующего контура и нагрузки.

Тиристоры включаются управляющими импульсами тока, поступающими от блока распределителя импульсов А2. БРИ состоит из трансформаторных блоков БТ1-БТ4, входы которых через токоограничивающие резисторы подключены к цепям «Импульс 1» и «Импульс 2», идущим от БУК. БРИ предназначен для размножения импульсов и потенциальной развязки цепей управления тиристоров с низковольтным выходом БУК.

Силовые выводы диодов шунтированы варисторами  $RU_1, RU_2$  и демпфирующими RC-цепочками. Силовые выводы тиристоров шунтированы отдельными RC-цепочками и соединены с блоком контроля инвертора БКИ. Вентильный мост инвертора соединен с входом блока защиты от перенапряжений БЗП А3.

В БКИ варисторы  $RU_1-RU_8$  подключены к тиристорам инвертора через конденсаторы, шунтированные защитными диодами. При перенапряжениях на тиристорах через соответствующие варисторы протекает ток, заряжающий конденсаторы, и при определенной энергии перенапряжений включаются соответствующие транзисторы и оптопары, в результате чего запираются соответствующие транзисторы, выдающие сигнал высокого уровня в соответствующие цепи «Перенапряжения инвертора».

Одновременно вследствие шунтирования входов соответствующих оптопар  $V_1-V_4$  формируется сигнал высокого уровня в цепи «Контроль инвертора». Происходит аварийное отключение ППЧ с выдачей диагностики индикаторами БУК и ПУ.

Схема контроля и защиты преобразователя частоты выполнена в соответствии с А. с. 1636921 (СССР).

На рис. 7 показана комплектация БСП силовыми тиристорами, диодами (сверху) и мощными полупроводниковыми резисторами (снизу).

Замена силовых полупроводников БСП производится согласно ТУ на эти элементы. При установке силовых приборов — тиристоров, диодов и резисторов таблеточной конструкции (ТБ, ДЧ и РК) — на шпильках БСП обеспечивается необходимый момент затяжки гаек (16–30 Нм).

На рис. 8 показана тыльная сторона БСП, установленного в стойку шкафа ППЧ. Информативность приведенных фотографий более полная, чем словесное изложение

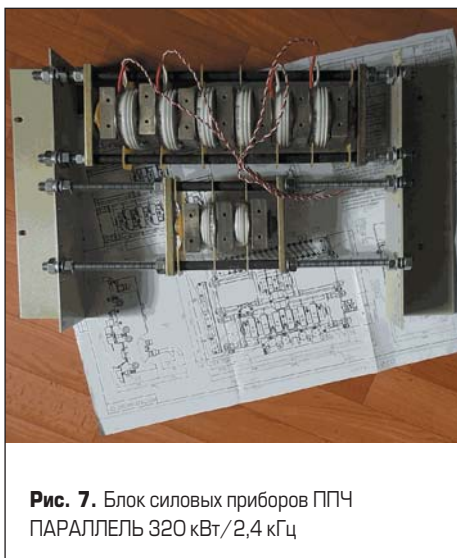


Рис. 7. Блок силовых приборов ППЧ ПАРАЛЛЕЛЬ 320 кВт/2,4 кГц

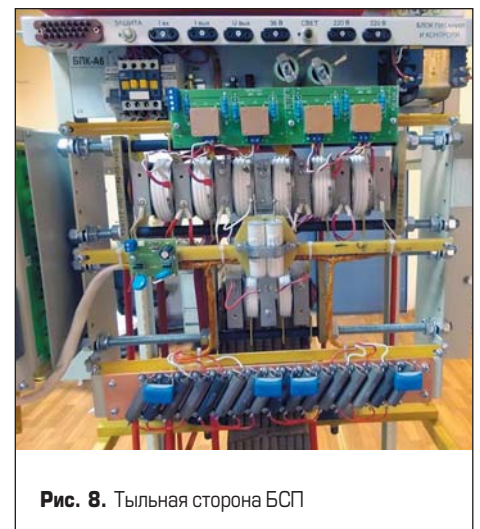


Рис. 8. Тыльная сторона БСП

и описание узлов и блоков ППЧ, они дают необходимое представление о размещении компонентов ППЧ, а также о конструктивном выполнении узлов и блоков.

**Входной дроссель постоянного тока**

В составе инвертора имеются несколько крупногабаритных узлов — дроссель фильтра постоянного тока  $L_d$ , электротермические конденсаторы C1, C2 и два коммутирующих дросселя L1, L2.

Дроссель постоянного тока предназначен для того, чтобы сглаживать постоянный ток инвертора и предотвращать проникновение высокочастотных гармоник выходного тока инвертора в питающую ППЧ трехфазную сеть. Дроссель постоянного тока тиристорного инвертора представляет собой магнитопровод с двумя симметричными обмотками, выполненными из медных трубок значительного сечения с немагнитным зазором.

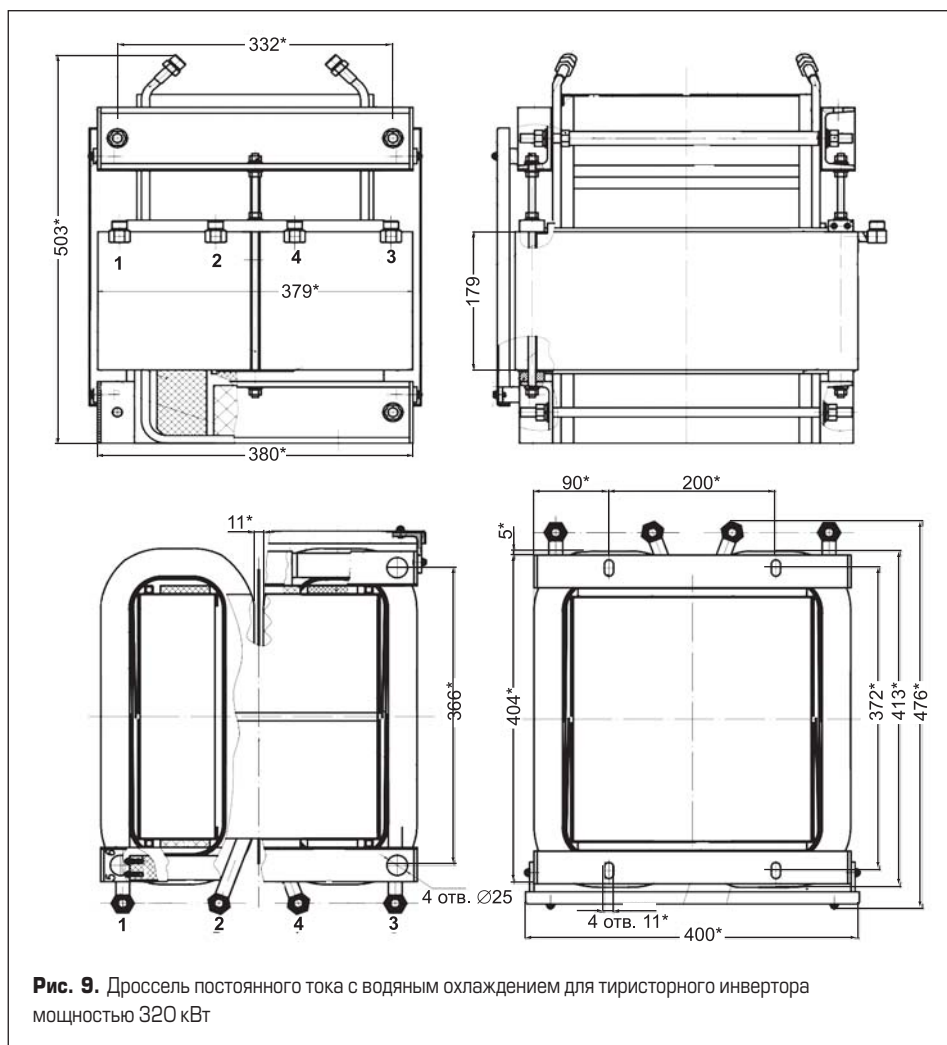
На рис. 9 приведена конструкция силового дросселя с водяным охлаждением для тиристорного инвертора мощностью 320 кВт. О назначении и особенностях работы дросселя в схеме автономного инвертора, а также об определении требуемых параметров индуктивности дросселя с сердечником подробно рассказано в работах [11–13]. Габариты и присоединительные размеры дросселя постоянного тока позволяют разместить его в шкафу тиристорного ППЧ-320-2.4.

На рис. 10 показано, как размещены дроссель  $L_d$  и силовые конденсаторы в стойке шкафа ППЧ. Рядом с дросселем установлены силовые, иначе печные, электротермические конденсаторы типа ЭЭПВ-0.8-2.4-4У3. Водоохлаждаемый конденсатор такого типа имеет реактивную мощность 850 кВАр в единице, его масса составляет около 28 кг. Конденсаторы отделяют нагрузку инвертора от питающей сети, поэтому напряжения на ее вводах симметричны относительно «земли», что обеспечивает защиту ППЧ при случайных замыканиях нагрузки на заземленные элементы конструкции.

При разработке конструкции ППЧ-320-2.4 особое внимание было уделено размещению дросселя постоянного тока, коммутирующих конденсаторов и коммутирующих дросселей, поскольку



**Рис. 10.** Размещение дросселя постоянного тока и силовых конденсаторов



**Рис. 9.** Дроссель постоянного тока с водяным охлаждением для тиристорного инвертора мощностью 320 кВт

именно они определяют массо-габаритные показатели ППЧ большой мощности.

На рис. 11 приведены силовой дроссель постоянного тока и коммутирующие катушки ППЧ, которые помогают получить представление о способе крепления и о расположении катушек индуктивности L1 и L2 относительно стойки шкафа ППЧ.

На рис. 12 показаны стойки шкафов преобразователей ПАРАЛЛЕЛЬ ППЧ-320-2.4 с рассмотренными силовыми узлами и блоками, находящиеся в процессе монтажа.



**Рис. 11.** Силовой дроссель постоянного тока и катушки коммутирующие ППЧ

**Внешние подключения преобразователя**

Наряду с преобразователем в индукционный комплекс нагрева ТВЧ входят индукционный нагреватель (печь ТВЧ) и блок компенсации (БК). Кроме того, в индукционной установке используются различные коммутационные устройства, дистанционный (выносной) пульт управления нагревом (ПУН),



**Рис. 12.** Стойки ППЧ-320-2.4 с силовыми узлами

станция охлаждения (СО), различные приводы, измерители и регуляторы температуры, а также токопроводы, кабели и электрические жгуты, электрически связывающие составные части индукционного комплекса. Эти узлы подключаются при монтаже ППЧ, на месте эксплуатации, а также как дополнительные компоненты индукционной установки.

В зависимости от особенностей исполнения и назначения индукционной установки, ППЧ может быть изготовлен в различных вариантах, в зависимости от внешних подключений.

Внешние подключения ППЧ — это его соединения с электрической сетью, системой водоохлаждения, нагрузкой и другими устройствами, входящими в комплекс индукционной установки.

На рис. 13 показаны внешние подключения шкафа и общий вид преобразователя ПАРАЛЛЕЛЬ ППЧ-320-2,4. Разъем внешнего управления служит для связи ППЧ с технологическим контроллером либо с пультом управления нагревом (ПУН). На розетку выведены вход управления мощностью нормированным сигналом 0–10 В, вход релейного управления нагревом, цепь включения контактора, цепь «аварийный стоп».

Разъемы внутри шкафа предназначены для связи с внешними устройствами: станцией охлаждения, приводом наклона индукционной печи, блоком компенсации и выключателем нагрева. На эти разъемы устанавливаются заглушки и вилки межблочных соединений при работе ППЧ, состоящего из двух преобразователей общей мощностью 630 кВт. В этом случае перечисленные разъемы устанавливаются на цоколе шкафа, их закрывают заглушками с гермовводами, которые являются неотъемлемой частью кабелей, связывающих преобразователь с внешними устройствами.

На шкафу преобразователя установлены приборы контроля выходного тока и напряжения, погрешность которых не превышает 2,5%, и индикатор выходного напряжения ин-

вертора в масштабе 0–100%. Для технического обслуживания ППЧ предусмотрены лампы местного освещения и розетки питания сервисных устройств напряжением 220 и 36 В.

Потребность в специальном охлаждаемом токопроводе нагрузки, выносном пульте управления нагревом (ПУН) и станции охлаждения (СО) определяется условиями эксплуатации. Водяной вентиль и фильтр могут выполняться как единая совмещенная конструкция. Выходные контакты преобразователя частоты Н1 и Н2, выполненные в виде штуцеров, предназначены для присоединения мощных водоохлаждаемых токопроводов, которыми подключается индукционная нагрузка. При использовании неохлаждаемых кабелей используются переходники, а контакты шкафа Н1 и Н2 соединяются шлангом.

В случае отсоединения индуктора выравнивание постоянных составляющих напряжения на коммутирующих конденсаторах и разряд внешней батареи компенсирующих конденсаторов обеспечивают специальные резисторы, соединяющие клеммы выходов преобразователя с корпусом.

Для тиристорного преобразователя ПАРАЛЛЕЛЬ-320-2,4 УХЛ4 климатическое исполнение и требуемые условия размещения соответствуют ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543.1-89. Степень защиты шкафа преобразователя установлена в соответствии с ГОСТ 14254-96, исключая контакты для подключения индуктора IP54.

Товарные знаки ПАРАЛЛЕЛЬ зарегистрированы в Государственном реестре и защищены свидетельствами Роспатента № 141419 и № 167346.

Современные ППЧ заменяют аналогичные тиристорные преобразователи, израсходовавшие ресурс. Стало возможным ремонтировать их не прерывая эксплуатации, в первую очередь вследствие непрерывного улучшения технических характеристик силовых полупроводниковых приборов и конденсаторов. Если необходимо повысить мощность установки

индукционного нагрева, организуется параллельная работа преобразователей [14–17].

Благодаря такой конструкции рассмотренного преобразователя допустима взаимозаменяемость однотипных элементов, узлов, блоков, ячеек. Для обеспечения длительной и надежной работы рассмотренных силовых узлов ППЧ и индукционной установки рекомендуется использовать станцию охлаждения ПАРАЛЛЕЛЬ СО-40. При параллельной работе двух преобразователей общей мощностью 630 кВт требуется станция охлаждения ПАРАЛЛЕЛЬ СО-60 [18].

## Итоги

Современные тиристорные преобразователи частоты позволяют осуществить эффективную замену устаревших ППЧ и техническую модернизацию электротермических установок с нагревом ТВЧ. В статье представлены основные достоинства мощного тиристорного преобразователя повышенной частоты, отличающие его от устаревших ППЧ 10-летней давности, предназначенных для промышленных установок индукционного нагрева.

Описание конструкции, принципа действия и особенностей работы основных узлов и силовых блоков ППЧ будет полезно специалистам по эксплуатации изделий электротехнического профиля и инженерам-разработчикам. Показано, что особое внимание при проектировании силовых элементов конструкции ППЧ следует уделять системе водяного охлаждения.

Особенностью ППЧ ПАРАЛЛЕЛЬ является использование унифицированных узлов и силовых блоков, что позволяет существенно сократить сроки проектирования новых ППЧ для питания электротермических установок ТВЧ. Впрочем, унификация конструкции не исключает возможности внесения изменений в силовые узлы и блоки ППЧ, которые улучшили бы технические характеристики преобразователя.

## Литература

1. Преобразователь частоты ПАРАЛЛЕЛЬ П П Ч - 3 2 0 - 2 , 4 У Х Л 4 . П а с п о р т МБ И Д . 4 3 5 4 2 2 . 0 3 9 П С и р у к о в о д с т в о п о э к с п л у а т а ц и и МБ И Д . 4 3 5 4 2 2 . 0 3 9 Р Э .
2. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М: Энергоатомиздат. 1989. 168 с.
3. Зинин Ю. М. Методика схемотехнического моделирования и реновация резонансных инверторно-индукционных электротехнических комплексов // Вестник УГАТУ. 2005. Т. 6. № 2 (13).
4. Зинин Ю., Мульменко М. Научно-производственное объединение «ПАРАЛЛЕЛЬ» (г. Уфа) на рынке силовой электроники России и ТС / Беларусь // Электроника-Инфо (Силовая электроника). 2015. № 6.
5. [www.power-e.ru/archive.php](http://www.power-e.ru/archive.php) (Архив журнала «Силовая электроника»).
6. Валиуллина З., Зинин Ю. Тиристорные инверторы с обратными диодами для преобразователей частоты в установках ин-

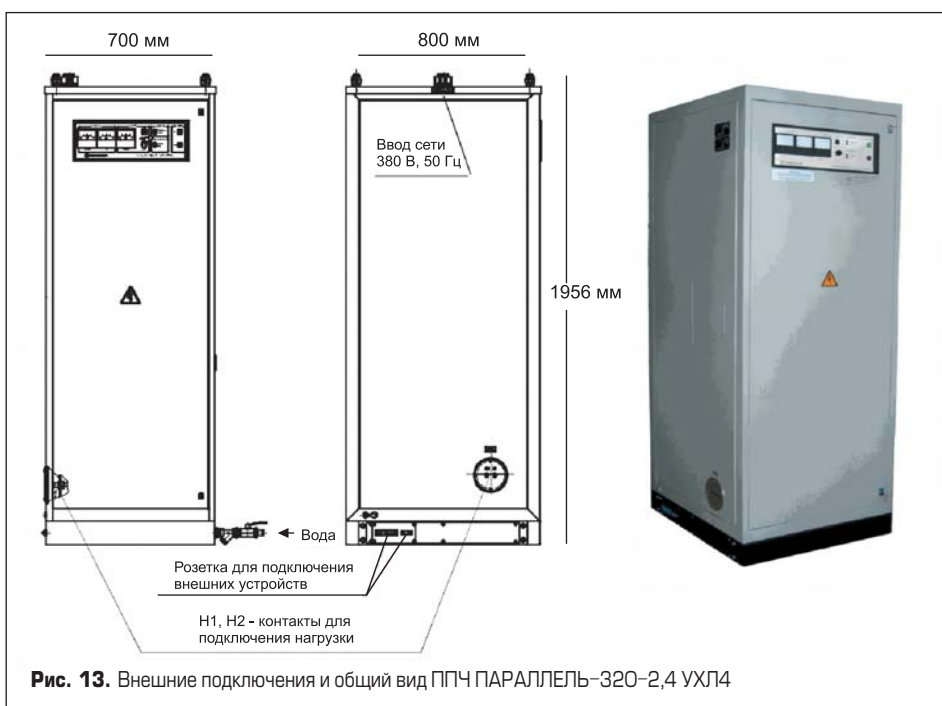


Рис. 13. Внешние подключения и общий вид ППЧ ПАРАЛЛЕЛЬ-320-2,4 УХЛ4

- дукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 4.
7. Зинин Ю. Комбинированный расчет электромагнитных процессов в схеме мостового инвертора с удвоением частоты // Силовая электроника. 2011. № 2.
  8. Зинин Ю., Рахимова И. Мостовая схема тиристорного инвертора тока для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2009. № 3.
  9. Зинин Ю., Мамаева Д. Схемотехническое моделирование полирезонансного источника электропитания в программе Micro-Cap 10 // Силовая электроника. 2016. № 2.
  10. Мульменко М., Зинин Ю., Мамаева Д. Разработка универсального блока управления и контроля для полупроводниковых преобразователей частоты // Силовая электроника. 2015. № 5.
  11. Валиуллина З., Егоров А., Есаулов А., Зинин Ю. Исследование средствами схемотехнического моделирования нелинейного дросселя переменного тока в составе тиристорного высокочастотного инвертора // Силовая электроника. 2008. № 2.
  12. Валиуллина З., Зинин Ю. Схемотехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2007. № 1.
  13. Валиуллина З., Зинин Ю. Проектирование тиристорного инверторно-индукторного закалочного комплекса с выходным трансформатором // Силовая электроника. 2007. № 3.
  14. Мамаева Д., Зинин Ю. Индукционные плавильные установки «ПАРАЛЛЕЛЬ» с высокочастотным нагревом металлов // Силовая электроника. 2016. № 2.
  15. Зинин Ю., Мульменко М. Современные тиристорные преобразователи частоты типа «Параллель» для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2015. № 3.
  16. Зинин Ю., Мульменко М. Новые разработки силовых преобразователей типа «Параллель» для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2014. № 2.
  17. Зинин Ю., Иванов А., Мульменко М., Уржумсков А. Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева труб большого диаметра // Силовая электроника. 2014. № 6.
  18. Зинин Ю., Мульменко М. Проектирование станций охлаждения для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2015. № 2.