

Новые разработки силовых преобразователей типа «Параллель»

для установок индукционного нагрева металлов

Юрий Зинин, к. т. н.

umz42@mail.ru

Михаил Мульменко, к. т. н.

mulmenko@prl.ru

Среди мощных силовых преобразователей частоты (10–300 кВт и выше) лидерами, со времени их разработки в прошлом веке, стали тиристорные преобразователи — громоздкие, но уже «статические», т. е. полупроводниковые силовые устройства, успешно заменившие на промышленных предприятиях страны электромашинные и ламповые генераторы в установках для индукционного нагрева металлов. Тиристорные преобразователи частоты (ПЧ) широко применяются на промышленных предприятиях и сейчас.

В статье описана новая разработка компактного силового ПЧ и его блока управления, выполненная на новой элементной базе — IGBT-модулях с обратными диодами, которые обеспечивают преобразователю соответствие современным требованиям в отношении массогабаритных показателей, КПД и др. Рассмотрены особенности многофункционального высокочастотного ПЧ типа «Параллель» мощностью 30 кВт, частотой 66 кГц.

Далее будет приведено описание принципа действия и конструктивного исполнения полупроводникового ПЧ на IGBT-модулях, предназначенного для преобразования энергии источника постоянного тока, подключенного к трехфазному напряжению питающей сети, в высокочастотное однофазное переменное напряжение. ПЧ используется для питания электротермических установок с нагревом обрабатываемых изделий токами высокой частоты (ТВЧ).

Введение

Накопленный 40-летний опыт разработки и эксплуатации уфимских ПЧ подтверждает, что полупроводниковые индукционные установки эффективны, экологически безопасны, удобны в эксплуатации. Сегодня в Уфе производится полный комплекс оборудования технологических установок для индукционного нагрева металлов — ПЧ, выходные закалочные трансформаторы, высокочастотные силовые кабели, станции охлаждения, индукционные плавильные печи, индукторы и пр. [1].

НПО «Параллель», представитель уфимской научной школы силовой электроники, на основе большого количества изобретений разработало гамму изделий для индукционного нагрева металлов:

ПЧ, индукционные установки различного назначения, станции охлаждения, индукционные нагреватели, печи и т. п. Фирма проводит работу, согласно ОКВЭД, в области разработки проектов промышленных процессов и производств, относящихся к электротехнике, электронной технике, горному делу, химической технологии, машиностроению, а также в области промышленного строительства, системотехники и техники безопасности — отраслях, актуальных для промышленности Башкирии и России [2].

Опыт длительной эксплуатации силовых ПЧ типа «Параллель» в составе электротермического оборудования установок индукционного нагрева металлов, выполненных на основе тиристорных и других полупроводниковых автономных инверторов, показал их актуальность и преимущества в сравнении с электромашинными и ламповыми генераторами.

Силовые преобразователи частоты для установок индукционного нагрева ТВЧ

Основным путем совершенствования характеристик ПЧ является использование современной элементной базы силовой схемы и системы управления. Мощные тиристоры, бывшие технологической новинкой силовых полупроводниковых приборов в 70-е годы прошлого столетия, к настоящему времени позволили создать эффективную замену электромашинным и ламповым ПЧ практически по всем эксплуатационным показателям.

В первых уфимских промышленных тиристорных ПЧ мощностью 120 кВт частотой 2,4 кГц использовались 32 тиристора ТЛ2-160-8 с водяными охладителями и 32 силовых диода, применялись громоздкие электротермические конденсаторы, медные воздушные дроссели и охлаждаемые проточной водой индуктивности. Эти силовые компоненты с помощью медных шин соединялись в силовую схему преобразователя и размещались на стеклотекстолитовой плате, которая помещалась в специальный стальной шкаф значительных габаритов.

Конструкция преобразователя поражала своей простотой и размерами. Он подключался к сетевому шкафу ввода питания и индукционному нагревателю методического действия, имеющему, как правило, еще более впечатляющие размеры.

Коэффициент использования установленной мощности тиристорных на высокой частоте был очень мал. Именно тогда у конструкторов родилась идея разработать малогабаритный полупроводниковый ПЧ с использованием одного высокочастотного силового модуля. Разработка силовых MOSFET и затем мощных высокочастотных IGBT-модулей с обратным диодом позволила реализовать такой преобразователь в компактном исполнении.

Силовой полупроводниковый прибор — биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ) — впервые был предложен русскими учеными; на его основе в 1979 г. за рубежом был разработан IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor), используемый сначала как мощный электронный ключ в системах управления электрическими приводами, затем в импульсных источниках питания, а потом и в высокочастотных инверторах для установок индукционного нагрева.

По своей внутренней структуре БТИЗ представляет собой каскадное включение двух электронных ключей: входной ключ на полевом транзисторе управляет мощным ключом на биполярном транзисторе. Составное включение полевого и биполярного транзисторов позволяет сочетать в одном устройстве достоинства обоих типов полупроводниковых приборов. В современных полупроводниковых модулях параллельно IGBT включен неуправляемый силовой диод.

Рабочие показатели IGBT постоянно совершенствуются: увеличивается коммутлируемое напряжение; растут допустимые токи; увеличивается частота коммутации, уменьшаются потери мощности. Поэтому сейчас модули IGBT широко распространены во всем мире в изделиях силовой электроники [3].

Современные разработки силовых ПЧ для индукционной технологии различные производители выполняют, в основном, на IGBT-модулях. Повышение рабочей частоты, целесообразное для многих индукционных технологий с использованием ТВЧ, уменьшает также габариты и массу совместно используемых электромагнитных силовых компонентов преобразователей — дросселей, трансформаторов и конденсаторов, а значит, уменьшает их стоимость. Если суммировать стоимость компонентов тиристорного ПЧ, требующего применения силовых тиристорных и диодов, а также габаритного силового дросселя постоянного тока с «железом» и сравнить с аналогичным по выходным параметрам преобразователем на силовых IGBT-модулях, стоимость последнего сегодня окажется на треть меньше.

На рис. 1 показаны высоковольтные мощные IGBT-модули, широко используемые в современных зарубежных и отечественных силовых ПЧ. На рис. 1 видны силовые токопроводящие шины и силовые конденсаторы, подсоединяемые к компактному полупроводниковому модулю с двумя IGBT и обратными диодами.

Отметим, что исследования силовых устройств электроники обходятся дорого и требуют специальной квалификации инженеров. Сейчас в России мало востребованы научные исследования. Подтверждением этому служит недавнее сообщение национального научного

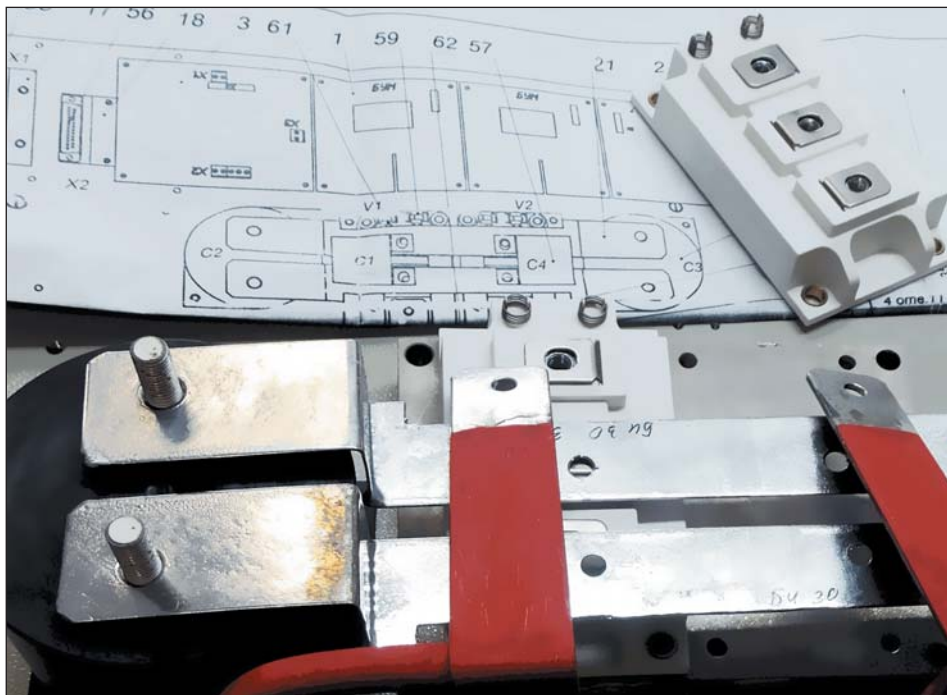


Рис. 1. Высоковольтные IGBT-модули

совета США [4]. В докладе, отображающем положение ученых в разных странах, сообщается, что в то время как, в частности, Китай утраивает финансирование научно-исследовательских работ, российская наука выпала из мирового тренда. Сегодня Азия, в целом, стала финансировать научные исследования больше, чем США.

Отстает не только Россия, но и Япония с Европой. Только с 2003 по 2012 г. объем высокотехнологичного производства в Китае вырос в шесть раз, и теперь его доля в этом сегменте составляет 24% против 27 у США. Исследователи отметили, что, помимо инвестирования в разработки, Китай, а также догоняющая его Южная Корея сосредоточились на «зеленой» энергетике — энерго- и ресурсосберегающих технологиях. Поэтому китайские электронные изделия, в том числе и современные ПЧ для индукционного нагрева металлов, широко представлены на отечественном рынке промышленных товаров.

К настоящему времени общепризнано, что этап теоретических исследований электромагнитных процессов в ПЧ пройден. Исследователи определились с основными схемами силовых инверторов и особенностями их функционирования в установках ТВЧ. При научных исследованиях в процессе разработки ПЧ широко используются методы математического, схемотехнического моделирования, позволяющие учесть особенности электромагнитных процессов. Тем не менее отметим, что только в последней, 11-й версии программы схемотехнического моделирования Micro-Cap появились модели IGBT, а в предыдущей, 10-й версии еще моделировались силовые MOSFET.

Обычно по результатам моделирования выполняется макет преобразователя и производится его проверка на физической модели. На рис. 2 показан макет для исследования электромагнитных процессов в демпфирующих (снабберных) элементах IGBT-модулей высокочастотного ПЧ.



Рис. 2. Исследование электромагнитных процессов в снабберных элементах IGBT-модулей



Рис. 3. Индукционная установка для пайки режущего инструмента токами ВЧ

Основной целью исследований является разработка, проектирование и изготовление новых образцов техники, которые необходимы производственным предприятиям. Индукционная технология является востребованной областью народного хозяйства и эффективно решает многие проблемы промышленного производства [5]. На рис. 3 показан оригинальный электротермический комплекс для индукционного нагрева металлов ТВЧ, выполненный на IGBT-модулях.

Назначением силового комплекса является высокочастотная индукционная пайка и закалка режущего инструмента (резцы, сверла, фрезы, пилы и т. д.) ТВЧ. Установки мощностью 30 кВт частотой до 66 кГц успешно заменяют собой устаревшие, требующие дорогостоящего ремонта лампыные высокочастотные установки серии ВЧГ либо тиристорные преобразователи, при этом экономится электроэнергия, охлаждающая вода, производственные пло-

щади, повышается надежность и электробезопасность (новое оборудование относится к электроустановкам с напряжением до 1000 В). Вся генераторная часть установки — транзисторный ПЧ, конденсаторный блок и высокочастотный трансформатор — размещена внутри компактного шкафа защищенной конструкции габаритами 700×600×1475 мм со степенью защиты IP 54 по ГОСТ 14254.

Подключение установки производится к трехфазной промышленной сети 380 В/50 Гц, а для ее охлаждения требуется проточная вода. Помимо шкафа генераторной установки, в состав индукционной установки входят сменные индукторы, вытяжное устройство DELI-M для присоединения к цеховой системе вентиляции и двухконтурная станция оборотного водяного охлаждения. Эта индукционная установка может быть использована не только для пайки, но и под индукционную наплавку, различные виды термообработки, а также под пластическую деформацию изделий.

Пульт управления установки, помимо обычных измерительных приборов, светосигнальных индикаторов и органов управления, снабжен буквенно-цифровым OLED-дисплеем, отображающим режимы работы в виде текстовых сообщений. В состав установки входит пульт управления нагревом с цифровым таймером, который по команде от ножной педали или от внешнего подающего механизма включает режим нагрева на заданный промежуток времени.

В качестве примера мощного преобразователя на IGBT-модулях укажем разработку индукционной установки для плавки отходов меди и отходов, содержащих драгоценные металлы. Индуктор плавильного узла позволяет вести плавку в штатном тигле емкостью 150 кг и в тигле емкостью 100 кг по меди. Индукционная установка состоит из полупроводникового ПЧ мощностью 100 кВт, индукционной печи с гидроприводом для слива расплава, блока компенсации реактивной мощности индуктора, выносного пульта управления нагревом и двухконтурной станции охлаждения.

Транзисторный ПЧ, заменивший тиристорный, отличается от последнего более высоким КПД, надежностью, малым весом и габаритами, а также меньшими акустическими шумами. Система управления, защиты и диагностики, помимо автоматического поддержания параметров техпроцесса, обеспечивает защиту от аварийных режимов с выдачей текстовых сообщений о состоянии и режимах работы плавильной установки на буквенно-цифровой дисплей. Эти индукционные установки и опыт их промышленной эксплуатации позволили приступить к проектированию и разработке малогабаритного ПЧ на IGBT-модулях.

Малогабаритный ПЧ на IGBT-модулях

Изложим принцип действия, устройство и работу малогабаритного ПЧ с силовой схемой полумостового инвертора, приведенной на рис. 4.

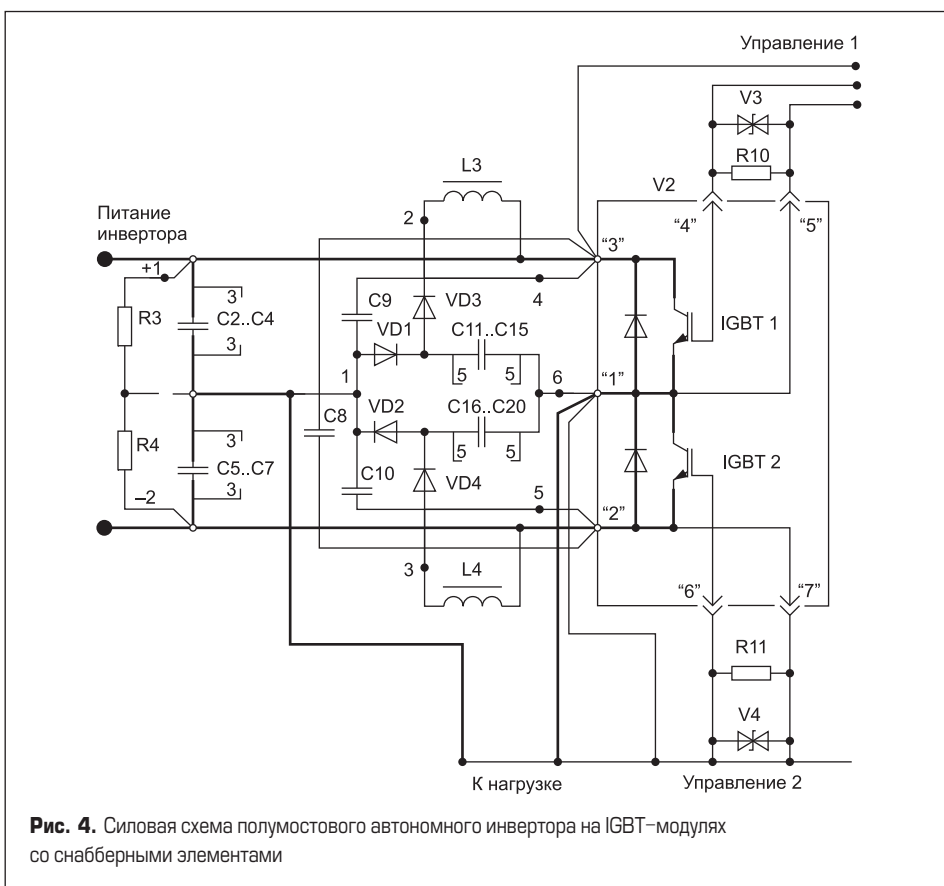


Рис. 4. Силовая схема полумостового автономного инвертора на IGBT-модулях со снабберными элементами

Инвертор полумостового типа состоит из конденсаторов фильтра C2–C7 (типа K78) и двух транзисторов IGBT-модуля V2 (в преобразователе использован модуль Semikron IGBT производства Германии, типа SKM400GB12), а также элементов снабберных цепей C8–C20, L3, L4 и VD1–VD4 [6].

Импульсы выходного напряжения инвертора возбуждают в нагрузочном колебательном контуре повторяющиеся колебания тока и напряжения, по форме близкие к синусоидальным. Нагрузкой инвертора служит колебательный контур, расположенный в блоке компенсации индукционной установки. Контур нагрузки настроен на частоту, равную частоте следования выходных импульсов напряжения инвертора.

Регулирование мощности, отдаваемой нагрузке, основано на ее резонансных свойствах. Изменение частоты управляющих импульсов и вместе с ней частоты импульсов выходного напряжения приводит к изменению мощности нагрузки в соответствии с резонансной кривой нагрузочного контура. Регулирование частоты управляющих импульсов, генерируемых блоком управления, производится по сигналу датчика, поступающего от пульта управления, либо от внешнего регулятора.

Блок управления ПЧ

Назначением системы управления является формирование и подача импульсов управле-

ния на силовые вентили (IGBT-модули) автономного инвертора.

Блок управления преобразователем частоты состоит из следующих узлов:

- генератор, управляемый напряжением (ГУН);
- делитель частоты;
- генератор длительности паузы (гарантированного времени, при котором отсутствует управление на обоих каналах);
- синхронизатор стартового и стопового импульсов;
- формирователь-распределитель импульсов;
- усилитель импульсов;
- формирователь опорного сигнала для канала регулирования фазы;
- канал регулирования фазы;
- канал регулирования амплитуды;
- схема плавного пуска и останова;
- схема защиты и индикации;
- схема блокировки автозапуска;
- инвертор напряжения датчика.

Сокращенные обозначения блоков преобразователя частоты:

- БУ — блок управления;
- БУД — блок управления драйверами;
- БУМ — блок управления модулем;
- ГУН — генератор, управляемый напряжением;
- ПУ — панель управления;
- ТН — трансформатор напряжения;
- УГ — управляемый генератор;
- ЯП — ячейка питания.

Рассмотрим особенности функциональной схемы блока управления и защиты ПЧ. Функциональная схема системы управления приведена на рис. 5.

Помимо генерации управляющих импульсов и регулирования выходной мощности, БУ обеспечивает пуск установки с максимальной частотой, прекращение генерации с предварительным повышением частоты и снижением мощности при управлении по целям «Стоп УГ» и «Пуск УГ», снятие сигналов «Управление» со входов транзисторов инвертора при аварийных режимах, а также формирует сигналы включения индикаторов защиты на ПУ и индикатора нагрева на кнопке «НАГРЕВ».

Связь БУ с силовой схемой и гальваническую развязку обеспечивают датчик входного тока инвертора, блоки БУМ и БУД, измерительный трансформатор тока. Генератор, управляемый напряжением, выполнен на специализированной микросхеме. Диапазон изменения частоты микросхемы задается внешними элементами — конденсатором и резисторами, в режиме свободной частоты и сдвига. С выхода ГУН напряжение в виде меандра, через делитель, поступает на два последовательно соединенных одновибратора, первый из которых формирует импульс паузы (т. е. время гарантированного выключения обоих каналов), а второй одновибратор синхронизирует моменты начала первого и конца последнего импульсов управления с импульсами ГУН.

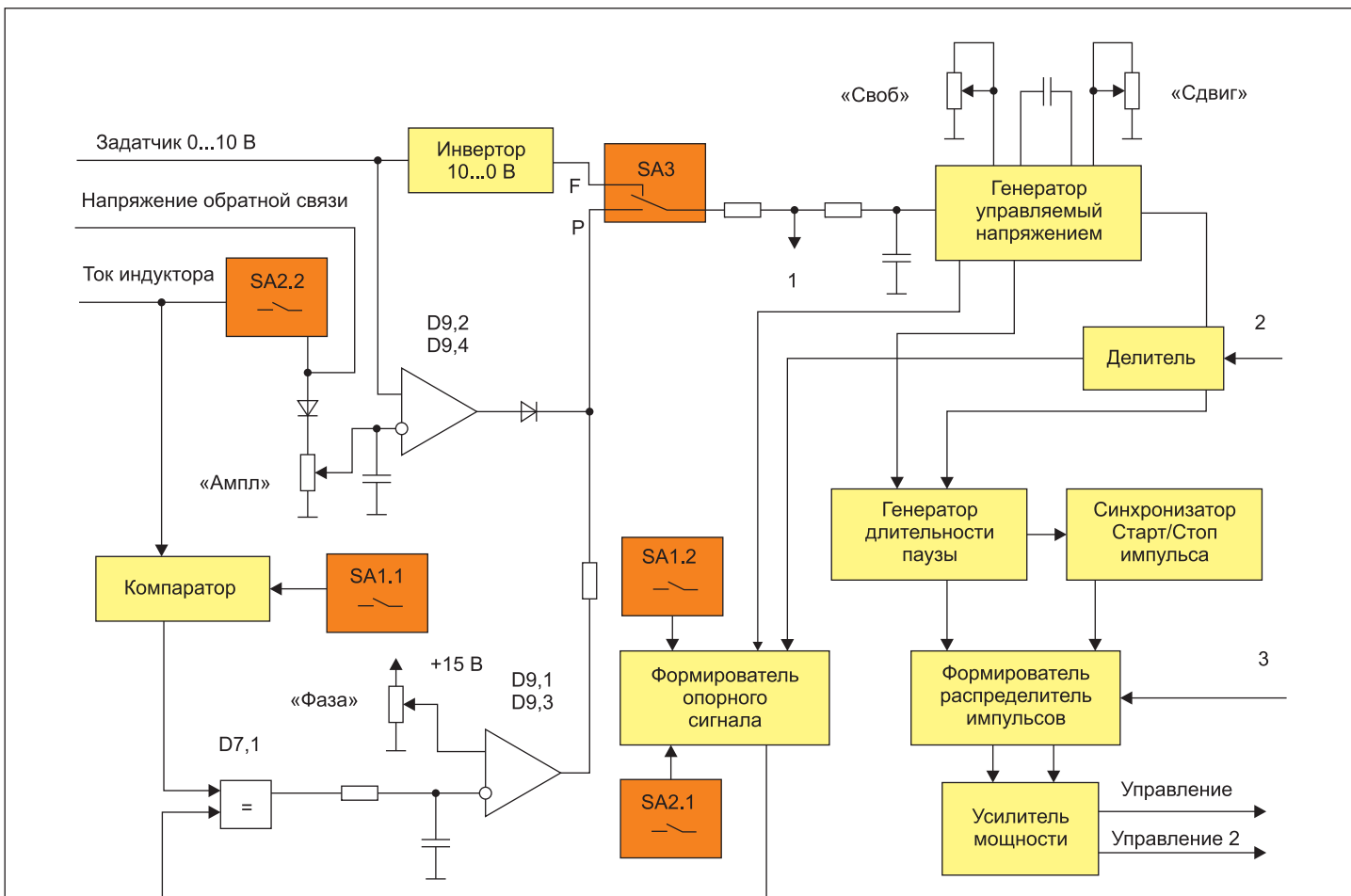


Рис. 5. Функциональная схема блока управления силовым ПЧ

От импульсов первого одновибратора переключается счетный триггер, выходные импульсы которого вместе с импульсами одновибраторов преобразуются логическими элементами микросхемы (формирователь-распределитель импульсов) в последовательность противофазных импульсов «Управление 1» и «Управление 2». Далее эти импульсы усиливаются усилителем мощности и поступают на выход блока управления.

Схема формирователя опорного сигнала подает на вход детектора фаз («исключающее ИЛИ») сигнал, несущий информацию о фазе напряжения колебательной нагрузки индукционной установки. Таким сигналом является выход счетного триггера — делителя частоты. С помощью триггера, инвертора и переключателей SA1.2 и SA2.1 этот сигнал можно сдвинуть на 1/4 или 1/8 периода для получения необходимой характеристики фазового компаратора.

Канал регулирования фазы (фазового угла нагрузки) служит для ограничения нижнего предела регулирования резонансной частотой нагрузки и содержит измеритель фазы «исключающее ИЛИ», фильтр низкой частоты, повторитель, задатчик фазы и усилитель. Входы измерителя фаз связаны с трансформатором тока индуктора и сигналом опорной частоты.

Назначение переключателей блока управления преобразователем:

- SA1.1 — инверсия сигнала компаратора (OFF);
- SA1.2 — сдвиг опорной частоты (ON);
- SA2.1 — значение сдвига опорной частоты 1/4 периода (OFF), значение сдвига опорной частоты 1/8 периода (ON);
- SA2.2 — стабилизация по сигналу напряжения обратной связи (OFF);
- SA3 — работа в режиме «Частота» (F), работа в режиме «Мощность» (P);
- SB1 — кнопка принудительного запуска генерации в режиме проверки.

С помощью переключателя SA1.1 можно инвертировать сигнал компаратора таким

образом, чтобы на резонансе получить сдвиг этого сигнала на 90° относительно опорной частоты (при этом получаем требуемую статическую характеристику измерителя фазы).

Выходным сигналом измерителя фазы являются прямоугольные импульсы постоянной амплитуды, скважность которых зависит от сдвига фаз между входными сигналами измерителя. После усреднения фильтром и усиления повторителем сигнал фазового угла в усилителе сравнивается с заданием, которое при настройке устанавливается соответствующим максимальному значению мощности преобразователя. Таким образом, при отсутствии сигналов от канала регулирования амплитуды, поступающих через диод, канал регулирования фазы поддерживает резонанс в нагрузке, т. е. максимально возможную мощность при настройке ПЧ.

Канал регулирования амплитуды своим входом связан с датчиком тока индуктора и состоит из выпрямителя, фильтра нижних частот и усилителя (D9.2, D9.4). Выходной сигнал усилителя D9.4 через диод и резисторы воздействует на вход ГУН, управляя его частотой. Конденсатор вместе с резисторами на входе ГУН образуют фильтр нижних частот, служащий для обеспечения устойчивости системы регулирования. Благодаря односторонней проводимости диода канал регулирования напряжения воздействует на частоту в сторону повышения лишь в том случае, когда напряжение с датчика тока нагрузки превышает заданное значение.

Сигнал задания в канал регулирования амплитуды поступает по цепи «Задатчик 0–10 В». Через инвертирующую схему и переключатель SA3 сигнал может быть непосредственно подан на вход ГУН в режиме «Частота». При необходимости стабилизировать какой-либо другой параметр нагрузки (например, температуру) размыкается переключатель SA2.2, а сигнал этого параметра величиной 0–10 В подается по цепи «Напряжение обратной связи».

Функциональная схема системы пуска и защиты преобразователя приведена на рис. 6, ее отличительной особенностью является реализация «плавного пуска» преобразователя. Схема пуска с цепями управления IGBT блока управления преобразователя связана контактами 1, 2 и 3.

Релейное регулирование мощности (отключение генерации выходного напряжения) происходит при замыкании цепи «Стоп УГ» блока управления на цепь «Общий 15 В». К этой цепи подключена также кнопка «НАГРЕВ», расположенная на ПУ. К этой же цепи может подключаться исполнительное реле регулятора температуры либо педаль управления нагревом.

Схема пуска и защиты обеспечивает необходимую последовательность включения/выключения нагрева, аварийное отключение и индикацию. Она включает в себя схему плавного пуска и останова инвертора, схему защиты и индикации и схему блокировки автозапуска. Схема плавного пуска и останова обеспечивает пуск инвертора преобразователя с максимальной частоты и его останов с предельным повышением частоты. Этим достигается включение/выключение нагрева на минимальных значениях потребляемой преобразователем мощности, что позволяет получить более благоприятные условия работы силовых элементов схемы и правильную работу каналов автоматического регулирования.

Уровни напряжения управляющих цепей контролируются триггером Шмидта, при разрешенном сочетании входных сигналов на выходе инвертирующего элемента появляется высокий уровень сигнала. Этот сигнал закрывает транзистор и одновременно, через резистор, позволяет конденсатору относительно быстро заряжаться. По достижении напряжением на конденсаторе уровня срабатывания триггера Шмидта, на его выходе появляется низкий уровень сигнала, разрешающий (путем запуска синхронизатора) генерацию выходных импульсов и зажигающий индикатор на кнопке включения нагрева в ПУ.

Частота импульсов управления определяется напряжением на предварительно заряженном до 10 В конденсаторе, который будет разряжаться до инвертированного напряжения датчика или напряжения канала регулирования (в зависимости от положения SA3) через резистор. При останове инвертора низкий уровень напряжения элемента D1.2 через диод разряжает конденсатор через резистор гораздо медленнее, чем при пуске, что позволяет напряжению (а следовательно, и частоте инвертора) достичь максимального значения 10 В благодаря открывшемуся до блокировки выходных импульсов триггеру Шмидта.

Схема блокировки автозапуска выполнена на отдельном триггере. В момент подачи питания триггер устанавливается в «запрещающее» состояние, при котором он своим выходным сигналом блокирует прохождение импульсов через формирователь и через транзистор разряжает конденсатор. Изменить состояние триггера возможно подачей положительного фронта сигнала на его стробирующий вход. Такой фронт получается при изменении сочетания управляющих сигналов «Стоп УГ»

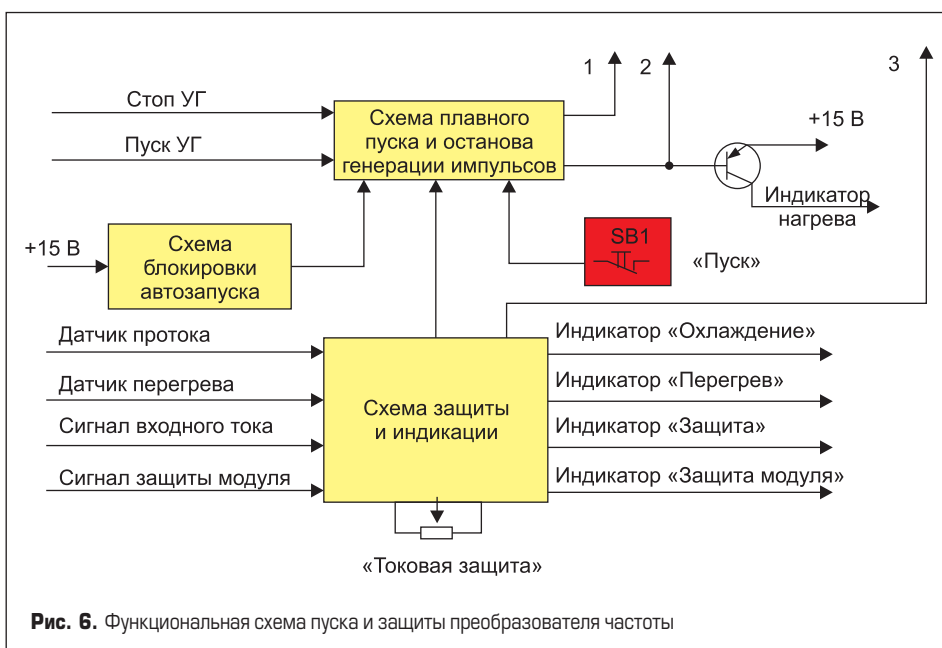


Рис. 6. Функциональная схема пуска и защиты преобразователя частоты

и «Пуск УГ» с запрещающего на разрешающее, или, другими словами, при включаемом нажатии кнопки «НАГРЕВ» на ПУ.

Если же эта кнопка была в нажатом состоянии до подачи питания, то состояние триггера не изменится, и для включения нагрева потребуются двукратное нажатие кнопки.

Кнопка «Пуск» (SB1) позволяет разрешить генерацию управляющих импульсов независимо от состояния цепей «Стоп УГ» и «Пуск УГ», а также переключает триггер в «разрешающее» состояние, что может потребоваться при настройке блока управления в режиме проверки.

Схема защиты и индикации состоит из триггера, ключей, компаратора и защитного тиристора. На входы компаратора поступают напряжения цепей «Датчик перегрева», «Датчик протока», «Сигнал защиты модуля» и сигнал с выхода компаратора. При превышении напряжением цепи «Сигнал входного тока» напряжения, заданного резистором, компаратор подает на соответствующий вход сигнал высокого уровня.

При нормальной работе блока управления защитный тиристор находится в выключенном состоянии, на входе «С» триггера присутствует высокий уровень напряжения, который разрешает свободное прохождение сигналов со входа на выходы триггера. При появлении аварийного сигнала на входе любого триггера сигнал с его выхода включает соответствующий ключ микросхемы и вызывает свечение светодиодов на пульте управления. Одновременно аварийные сигналы включают защитный тиристор, что вызывает переход напряжения на выводе «С» микросхемы триггеров в низкий уровень и фиксацию сигналов на выходах триггеров.

Питание функциональных узлов и системы управления ПЧ обеспечивает ЯП преобразователя, которая гальванически развязана от силовой цепи. Функциональная схема ЯП приведена на рис. 7.

Переключатель SA1 служит для перевода ПЧ в режим «ПРОВЕРКА», когда при отключенном силовом питании преобразователя через дополнительный автоматический выключатель и резисторы подключаются блоки ЯП и БУ с целью безопасной проверки функционирования управляющих цепей.

Напряжение 220 В/50 Гц через предохранитель, сетевой помехоподавляющий фильтр и балластный резистор подается на выпрямитель. Инвертор на транзисторах питается выпрямленным напряжением 310 В и выполнен по схеме полумостового инвертора, два плеча которого образованы резистивно-емкостным делителем. Транзисторы инвертора управляются драйвером, выполненным в виде отдельной микросхемы.

Устройство максимальной токовой защиты представляет собой тиристор, управляющая цепь которого подключена к резистору, включенному в цепь выходного постоянного тока сетевого выпрямителя. При токе 0,2–0,4 А тиристор включается и закорачивает цепь питания драйвера, в результате чего транзисторы инвертора закрываются, и красный светодиод «I» сигнализирует о срабатывании максимальной токовой защиты ЯП.

Со вторичных обмоток трансформатора напряжения высокой частоты напряжение

прямоугольной формы поступает на диодные выпрямители с фильтрующими конденсаторами, а также на стабилизаторы напряжения с выходными конденсаторами. В цепи выходных обмоток трансформатора включены самовосстанавливающиеся предохранители, резко увеличивающие сопротивление при нагрузке по току или при перегреве. После устранения перегрузки или перегрева они автоматически восстанавливают свое первоначальное сопротивление. Каждый выход ЯП снабжен цепью индикации напряжения.

Прекращение генерации управляющих импульсов возможно путем замыкания цепи «Стоп УГ» на «Общий 15 В», а также при замыкании цепи «Пуск УГ». До момента переключения триггера частота ГУН успевает подняться до максимального значения, а затем прекращается выдача управляющих импульсов на транзисторы инвертора. При включении нагрева импульсы управления начинают генерироваться с максимальной частоты. Такой порядок включения/выключения обеспечивает оптимальный режим работы силовых IGBT-модулей преобразователя.

Канал защиты по входному току имеет в своем составе компаратор, выходной сигнал с которого через D-триггер регистра памяти, диод и резистор подается на управляющий электрод защитного тиристора. При превышении сигналом уровня, устанавливаемого резистором, тиристор открывается и замыкает на «Общий 15 В» стробирующий вход регистра памяти, в результате чего фиксируется сработавший канал защиты и индикация перегрузки. Одновременно запрещается подача управляющих импульсов на инвертор.

В режиме проверки преобразователя кнопка SB1 служит для просмотра формы и частоты управляющих импульсов.

Панель управления

ПУ предназначена для контроля работы установки с помощью амперметра и вольтметра, которые показывают действующую величину выходного напряжения и тока выпрямителя. Так как питание силовой части

преобразователя осуществляется от неуправляемого трехфазного выпрямителя, произведение показаний приборов равно мощности, потребляемой инвертором.

Светодиодные индикаторы сигнализируют о включении питания системы управления, нехватке или перегреве охлаждающей воды, перегрузке преобразователя по входу или выходу. Встроенный светодиод кнопки «НАГРЕВ ВКЛ/ВЫКЛ» сигнализирует о включении нагрева (генерации ТВЧ).

Питание на силовую схему подается автоматическим выключателем, установленным на панели ввода. Управление электрическим режимом осуществляется кнопкой «НАГРЕВ» (включение генерации ТВЧ) и вращением ручки «ЗАДАНИЕ». Переключатель «ЗАДАНИЕ ВНУТР/ВНЕШ» позволяет перейти от датчика ПУ к сигналу внешнего задатчика. Внешний выключатель нагрева (педаль) подключается через розетку.

Сигнализация о работе преобразователя осуществляется следующим образом. При включении вилки кабеля питания в сетевую розетку загораются световые индикаторы фаз «СЕТЬ 380 В/50 Гц». После включения автоматического выключателя загораются световые индикаторы на ПУ. После нажатия кнопки «НАГРЕВ» инвертор генерирует ТВЧ, о чем сигнализирует светодиод, встроенный в эту кнопку.

Во время нагрева частота, а вместе с ней мощность установки изменяются по сигналу задатчика в диапазоне 0–10 В. При отключении нагрева происходит плавное повышение частоты и снижение мощности до минимума, а затем полное прекращение генерации ТВЧ. В этом режиме напряжение ТВЧ на индукторе отсутствует.

В случае аварийного отключения преобразователя одним из каналов электронной защиты включается тиристор БУ, и загорается красный индикатор, соответствующий сработавшему каналу защиты. Повторное включение установки возможно после сброса защиты отключением и повторным включением автомата панели ввода. Рассмотренная защита обеспечивает выключение преобразователя при перегрузках по току и неисправностях,

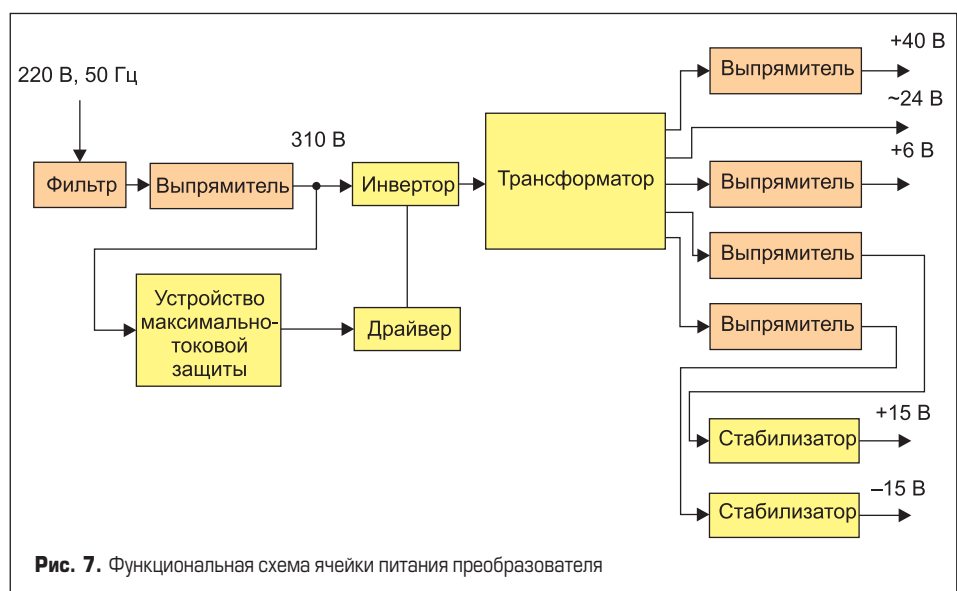


Рис. 7. Функциональная схема ячейки питания преобразователя

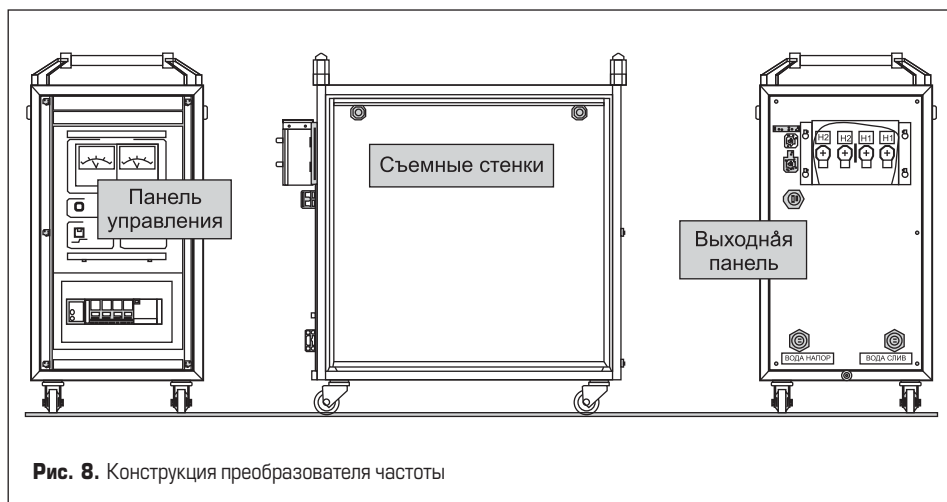


Рис. 8. Конструкция преобразователя частоты

возникающих в цепях после выпрямителя. При других неисправностях (в выпрямителе, коммутационной аппаратуре, замыканиях на «землю» и т. д.) защита осуществляется автоматическим выключателем и быстродействующим предохранителем.

Конструктивные особенности преобразователя

Конструкция преобразователя показана на рис. 8. Преобразователь размещен в стальном корпусе со съемными боковыми стенками, на передней стороне размещена панель ввода и панель управления, на задней стенке находится выходная панель с контактами-штуцерами, которые служат для присоединения к преобразователю блока компенсации с индуктором, на задней стенке размещены также разъемы «ТЕРМОМЕТР», «ВНЕШНЕЕ УПРАВЛЕНИЕ (ВУ)» и штуцеры для подключения к схеме водоснабжения.

В нижней части задней стенки, внутри корпуса, размещены штуцеры системы охлаждения с индикатором протока и термостатом, выше — сетевой фильтр радиопомех и магнитопровод выходного фильтра радиопомех. В средней части корпуса закреплена шасси-панель с ячейкой питания, блоком управления, блоком управления драйверами, блоком управления модулем и элементами силовой схемы преобразователя.

Напряжение на силовой выпрямитель подается через быстродействующий защитный выключатель, реагирующий на сверхтоки. Выключатель обеспечивает защиту от перегрузки и КЗ, он установлен на панели ввода, слева и справа от него расположены световые индикаторы фаз, показывающие наличие напряжений в каждой из трех фаз в сети и на входе выпрямителя.

На панели ввода также размещено реле контроля фаз. Это реле запрещает генерацию выходного тока в следующих аварийных ситуациях: отсутствие хотя бы одной из фаз; снижение напряжения ниже 160 В; повышение напряжения выше 260 В; асимметрия напряжений фаз более 40–55 В. Время отключения реле — регулируемое 0,1–10 с. Включение происходит автоматически после восстановления необходимого напряжения питания.

Помимо запрета генерации выходного тока, реле своими нормально-замкнутыми контактами создает цепь ускоренного разряда конденсаторов фильтра через мощный резистор после отключения питания преобразователя. Это реле имеет три светодиодных индикатора: зеленый светодиод светится, если напряжение в норме; красный светодиод горит, если асимметрия больше установленной, светодиода «U» светится при одновременном повышении напряжений фаз выше 260 В. При одновременном снижении напряжений фаз ниже 160 В светодиоды не светятся.

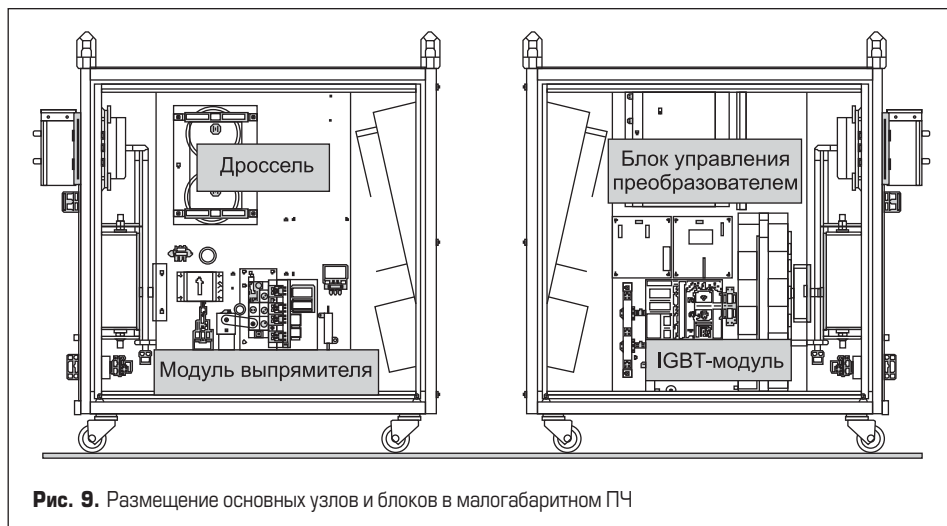


Рис. 9. Размещение основных узлов и блоков в малогабаритном ПЧ

Датчик входного тока выдает сигнал для максимально-токовой защиты, запирающей транзисторы инвертора в случае превышения входным током инвертора уставки, заданной блоком управления. Для дополнительной защиты выпрямителя служит быстродействующий предохранитель.

Размещение основных узлов и блоков в корпусе преобразователя показано на рис. 9. БУ, показанный на рис. 9 (справа), осуществляет:

- пуск установки с максимальной частоты, прекращение генерации импульсов с предварительным повышением частоты при управлении по цепям «Стоп УГ» и «Пуск УГ»;
- непрерывный контроль входного тока, аварийное отключение преобразователя в случае превышения установленного максимального значения входного тока с выдачей сигнала на индикатор ПУ;
- аварийное отключение преобразователя в случае перегрева или снижения ниже нормы подачи воды в систему охлаждения установки с выдачей сигналов на индикаторы;
- аварийное отключение установки в случае превышения допустимых значений тока силовых транзисторов с включением соответствующего индикатора;
- выдачу сигналов на индикаторы ПУ о включении питания системы управления и состоянии нагрева нагрузки;
- формирование управляющих импульсов требуемой длительности для включения транзисторов инвертора;
- автоматическую подстройку преобразователя на резонансную частоту нагрузочного контура, регулирование электрического режима по сигналу ПУ или внешнего регулятора, стабилизацию электрического режима при изменениях напряжения питающей сети либо напряжения на нагрузке;
- настройку и регулирование режима работы преобразователя и чувствительности его максимально-токовой защиты.

Конструктивно БУ выполнен на печатной плате стандарта «Евроменеханика». С целью подавления электромагнитных помех при работе инвертора, выходной трансформатор экранирован, а цепи постоянного тока заземлены через специальные конденсаторы.

Общий вид разработанного преобразователя показан на рис. 10. Переменное трехфазное напряжение 380 В/50 Гц через вилку кабеля питающей сети, автоматический выключатель и сетевой фильтр подается на входные контакты мостового выпрямителя. Выпрямленное напряжение величиной 520 В поступает на вход инвертора, который преобразует это напряжение в напряжение высокой частоты, соответствующей частоте управляющих импульсов, поступающих на транзисторы IGBT-модуля V2 через БУ драйверами и БУ модулем.

Основные технические характеристики преобразователя:

- номинальное напряжение питания 380 В;
- допустимое отклонение напряжения сети не более $\pm 10\%$ от номинального значения;
- частота питающей сети 50(60) Гц;
- число фаз питающей сети — 3;

- номинальная мощность 30 кВт;
- фазный ток питающей сети не более 60 А;
- номинальное напряжение на выходе, действующее значение первой гармоники — 230 В;
- диапазон регулирования тока выпрямителя 10–60 А;
- номинальная частота выходного напряжения 66 кГц $\pm 10\%$;
- электрический КПД 0,95;
- давление охлаждающей воды 2–4 кгс/см²;
- номинальный расход охлаждающей воды (вместе с блоком компенсации и индуктором) 0,6 м³/ч;
- габариты корпуса (без блока компенсации и индуктора) 698×352×679 мм;
- вес (без блока компенсации и индуктора) 54 кг;
- срок службы не менее 10 лет.

ПЧ предназначен для питания индукционных электротермических установок и управления электрическим режимом индукционных нагревателей (печей) в различных технологических процессах и при научных исследованиях. Разработанный преобразователь экономичен, удобен и безопасен в эксплуатации, обладает малыми габаритами и современным дизайном.

Питание индукционного нагревателя (нагрузки преобразователя) осуществляется через блок компенсации — согласующего устройства, компенсирующего реактивную мощность индуктора. Блок компенсации входит в индукционную установку вместе с преобразователем частоты и другими составными частями нагревательного комплекса. В настоящее время накоплен достаточный опыт промышленной эксплуатации мощных ПЧ с силовыми IGBT-модулями, который свидетельствует о целесообразности принятых проектных решений.

Рассмотренные особенности исполнения и технические характеристики малогабаритного высокочастотного ПЧ типа «Параллель» показывают, что он может применяться для различных целей в качестве универсального источника ТВЧ.

Заключение

Разработан малогабаритный многофункциональный ПЧ, выполненный на IGBT-модулях с обратными диодами. БУ преобразователем реализует необходимые контрольные, индикаторные и регулирующие функции. Расширение



Рис. 10. Общий вид преобразователя частоты «Параллель» ППЧ-30-66,0

функциональных возможностей и улучшение эксплуатационных показателей полупроводниковых преобразователей повышенной частоты обеспечивается применением IGBT-модулей с эффективными снабберными элементами и современных БУ. Электронный интерфейс преобразователей позволяет контролировать рабочие процессы и задавать необходимые параметры настроек технологического оборудования с использованием ТВЧ.

Литература

1. Зинин Ю. Дело жизни // Силовая электроника. 2013. № 5.
2. www.prl.ru
3. Колпаков А. Мифы и легенды российских электронщиков // Компоненты и технологии. 2007. № 9.
4. www.mk.ru/science/article/2014/02/10/982738-v-nauke-nam-uzhe-ne-dognat-ameriku.html
5. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
6. Володин В. Расчет нерассеивающего демпфера DC/AC-преобразователя // Силовая электроника. 2011. № 4.