

# Сварочный инвертор начального уровня:

## пример разработки

**В статье рассматривается пример простого сварочного инвертора, предназначенного для сварки штучным электродом. Приведены принципиальные электрические схемы блоков инвертора, изложены их функциональное назначение и принцип действия.**

**Сергей Петров**

x9999x@yandex.ru

Источники сварочного тока инверторного типа (ИИСТ) к настоящему времени в значительной степени вытеснили традиционные сварочные выпрямители, основой которых является понижающий трансформатор, работающий на частоте первичной сети 50–60 Гц. Серийное производство ИИСТ с силовой частью на мощных ключевых MOSFET или IGBT началось в середине 80-х годов прошлого века. В настоящее время все ведущие производители сварочного оборудования предлагают ИИСТ как профессионального назначения, так и бытового применения. Выпускаемое инверторное оборудование вытесняет «пятидесятигерцовое» во всех областях применения и сварочных технологиях: в ручной дуговой сварке плавящимся покрытым (штучным) электродом — технология MMA; в ручной дуговой сварке неплавящимся электродом в среде защитных газов — технология TIG; в автоматической и полуавтоматической сварке в среде защитных/активных газов плавящимся электродом (проволокой) — технология MIG/MAG; в плазменной резке, сварке алюминиевых сплавов на переменном токе повышенной частоты и в других, менее распространенных видах электрической дуговой сварки.

Для иллюстрации преимуществ ИИСТ относительно 50-Гц оборудования в таблице приведены основные энергетические и массо-габаритные показатели нескольких ИИСТ известных производителей. Эти данные можно рассматривать как типичные.

Сравнивая параметры трех сварочных инверторов с традиционным сварочным выпрямителем ESAB LHP 200, можно отметить, что современный ИИСТ имеет на порядок меньшую массу и существенно более высокий коэффициент полезного действия (КПД), нежели традиционный выпрямитель, при-

чем с питанием от трехфазной сети. По величине коэффициента мощности (КМ) ИИСТ не показывают преимуществ из-за того, что представляют собой емкостную нагрузку для первичной сети. При необходимости возможна установка в ИИСТ активного корректора КМ, что позволяет получать величину КМ порядка 0,99 (EWM Pico 162). С учетом больших функциональных возможностей ИИСТ, стабильности выходных параметров и постепенного снижения стоимости инверторного оборудования доля 50-Гц источников сварочного тока на рынке постоянно снижается. Тем не менее традиционные сварочные трансформаторы для сварки на переменном токе и выпрямители на базе таких трансформаторов сохраняют свои позиции благодаря ряду специфических качеств: низкая стоимость; высокая надежность при эксплуатации в сложных климатических и производственных условиях; возможность ремонта персоналом, не имеющим подготовки в области силовой преобразовательной техники; отсутствие в составе оборудования дорогостоящих и часто недоступных к оперативной поставке комплектующих.

В настоящей статье рассматриваются схемотехника, конструктивные особенности и вопросы выбора элементной базы сварочного инвертора «начального уровня» для сварки штучными электродами, предполагаемая область применения которого — небольшие ремонтные и монтажные предприятия, индивидуальные предприниматели, по роду своей деятельности нуждающиеся в сварочных работах. Предлагаемый ИИСТ может найти применение и в качестве бытового сварочного аппарата, так как благодаря легкому поджигу, формированию стабильной и эластичной дуги существенно облегчается и ускоряется обучение навыкам проведения сварочных работ непрофессиональным пользователем.

**Таблица.** Сравнительные параметры современных ИИСТ и сварочного выпрямителя традиционного типа ESAB LHP 200

Модель сварочного выпрямителя	КПД	КМ	Сварочный ток, А	Диаметр электрода, мм	Напряжение холостого хода	Вес, кг	Размеры, Ш×В×Д	Напряжение питания, В
ESAB LHP 200 (MMA)	0,65	0,75	30–170	1,6–4	59–67	56	650×600×520	3×220 60 Гц
Kemppi Master MLS 1600 (MMA)	0,8	0,75	10–160	1,6–4	80	14	180×390×410	230
ESAB CaddyArc 150 (MMA/TIG)	0,77	0,62	5–150	1,6–3,25	71–78	9	267×274×394	230
EWM Pico 162 (MMA/TIG)	0,88	0,99	10–150	1,6–4	105	4,8	116×365×224	138–265

Кроме того, обсуждаемый ИИСТ доступен для индивидуального изготовления подготовленными любителями. Статья не является строго научной с точки зрения конструктора РЭА и адресована широкому кругу читателей, интересующихся применением силовой преобразовательной техники в области источников сварочного тока, соответствующих современным тенденциям.

Сформулируем базовые технико-экономические требования к основным параметрам ИИСТ начального, бытового, «бюджетного» уровня. Исходя из области применения, описанной выше, сварочный аппарат должен работать от однофазной сети 220 В/50 Гц; обеспечивать возможность использования штучных электродов диаметром 1,6–3,25 мм при напряжении холостого хода не менее 60 В; КПД — 0,8–0,9; КМ — 0,6–0,75; иметь минимальную стоимость, вес и габариты, разумную надежность. Желательно, чтобы статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) инвертора имела крутопадающий вид. Также желательно обеспечить возможность проведения ремонта ИИСТ в условиях «обычных» мастерских, занимающихся ремонтом бытовой техники, и минимальные требования к периодическому техническому обслуживанию.

В соответствии с перечисленными требованиями был разработан и изготовлен эксперимен-

тальный образец сварочного инвертора начального уровня со следующими параметрами:

- диапазон сварочного тока 15–150 А;
- напряжение холостого хода 65 В;
- статическая ВАХ «штучкового» типа;
- КМ 0,65;
- КПД 0,85;
- вес 7,5 кг;
- габариты (Ш×В×Д) 170×185×245 мм;
- напряжение питания 220 В ±20%/50 Гц;
- диаметр электрода 1,6–3,25 мм;
- сервисные функции: антиприлипание электрода.

Из числа сервисных функций, характерных для современных ИИСТ профессионального и полупрофессионального уровня, в предлагаемом инверторе используется только «антиприлипание» — снижение тока нагрузки до минимального значения, если длительность короткого замыкания нагрузки превысила 2 с. Остальные функции, такие как форсирование тока дуги, «горячий старт», регулируемая крутизна ВАХ в рабочей области и некоторые другие, не реализованы с целью упрощения устройства и в связи с неочевидностью их востребованности пользователями ИИСТ начального уровня.

Принципиальная электрическая схема предлагаемого ИИСТ (рис. 1) является типичной для аппаратов этого класса и состоит из не-

скольких функционально самостоятельных блоков:

- источник питания силовой части: входной выпрямитель VD1, VD2 с емкостным фильтром C1 и нелинейной зарядной цепью (блок A1);
- силовая часть ИИСТ на базе однотактного конвертера: блок A2, силовой трансформатор T2, вторичный выпрямитель VD7–VD9, выходной дроссель L2;
- ШИМ-контроллер: блок A5, датчик тока нагрузки CS1, трансформатор тока T1;
- блок питания слаботочной части ИИСТ: блок A3;
- блок термозащиты и управления вентиляторами охлаждения: блок A4, вентиляторы M1, M2, датчики температуры DA1, DA3, K1;
- органы управления и индикации: SF1, R1, VD10–VD14.

Кратко рассмотрим каждый функциональный блок сварочного инвертора.

### Источник питания силовой части

Источник питания силовой части инвертора представляет собой первичный выпрямитель напряжения питающей сети 220 В/50 Гц, собранный на диодных мостах VD1 и VD2, и простейший фильтр — конденсатор C1. Для

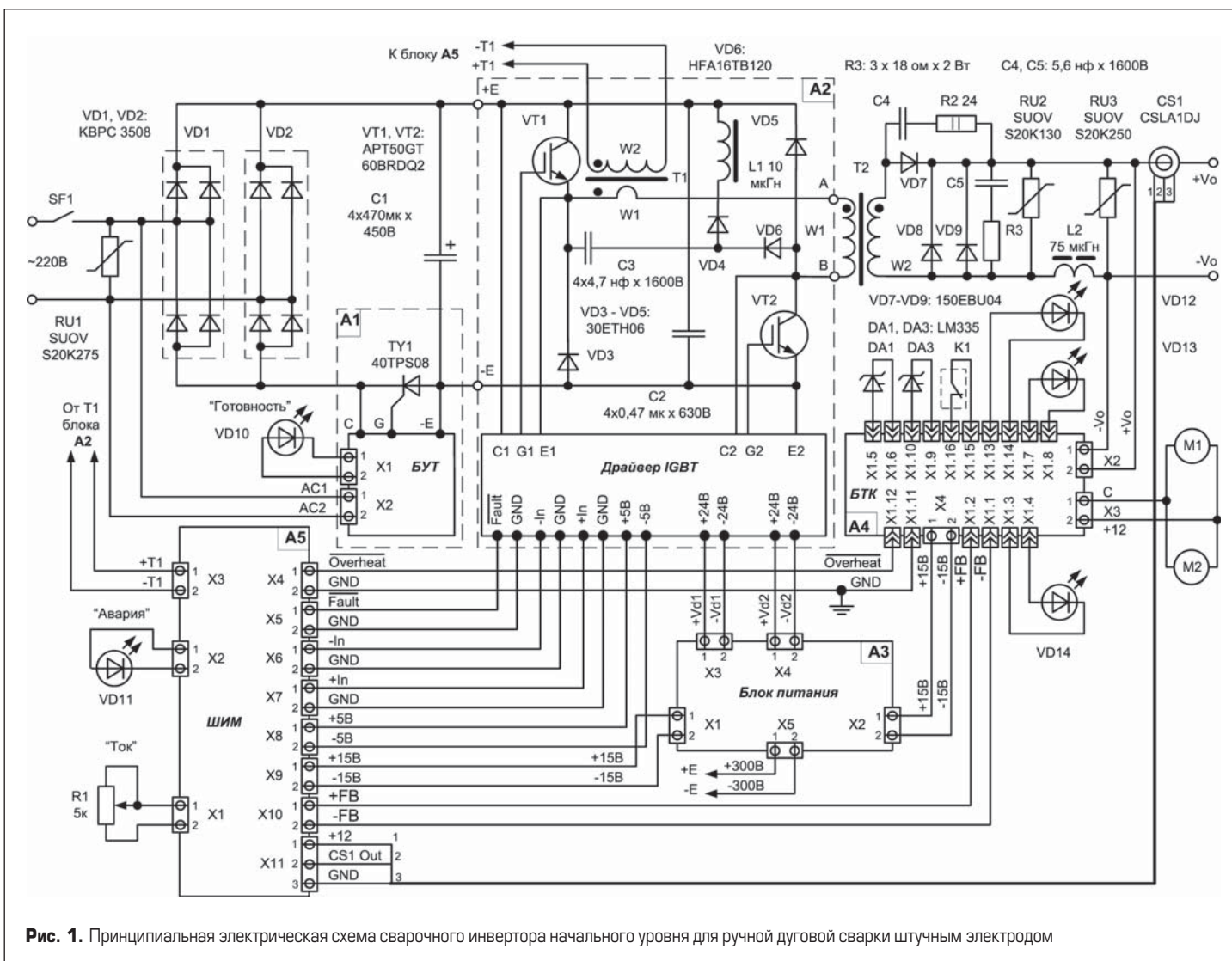


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема сварочного инвертора начального уровня для ручной дуговой сварки штучным электродом

ограничения тока зарядки C1 при включении ИИСТ используется нелинейная зарядная цепь, состоящая из токоограничивающего резистора R4 (расположен на плате БУТ блока A1) и шунтирующего тиристора TY1. Схема блока управления тиристором (БУТ) TY1 приведена на рис. 2 и представляет собой модификацию схемы, предложенной в [1].

Блок A1 обеспечивает плавный запуск ИИСТ. После замыкания контактов SF1 происходит медленная зарядка емкости C1 (рис. 1) через резистор R4 платы БУТ, тиристор TY1 в течение этого интервала времени находится в выключенном состоянии. По истечении некоторого времени задержки C1 заряжается, и БУТ переходит в штатный режим управления шунтирующим тиристором TY1. Дозарядка конденсатора C1 (рис. 1) происходит в каждом полупериоде сетевой частоты при разности мгновенных значений напряжения сети и напряжения на накопительном конденсаторе C1, равной 5 В. Таким образом реализован оптимальный способ управления тиристором — «при переходе напряжения на тиристоре через ноль». Амплитуда импульса управления TY1 поддерживается стабильной при колебаниях напряжения питающей сети в процессе работы ИИСТ. Ключ VT5 быстро разряжает времязадающие емкости после отключения ИИСТ от сети и подготавливает тем самым БУТ к повторному включению. Светодиод VD10 (рис. 1) индицирует состояние готовности ИИСТ к работе.

**Силовая часть ИИСТ**

Выбор оптимальной топологии силовой части ИИСТ является важным этапом разработки сварочного инвертора. Анализ промышленных ИИСТ, выпускаемых ведущими вендорами, и публикаций, посвященных источникам питания сварочной дуги, позволяет утверждать, что силовая часть большин-

ства ИИСТ построена по топологии одного из следующих типов: мостовой конвертер, полумостовой конвертер либо однотактный прямоходовой мостовой конвертер (ОПМК), часто эту топологию называют «косой мост», а также сдвоенный ОПМК. Стоимость и параметры современной силовой элементной базы таковы, что для реализации ИИСТ на ток до 150 А с питанием от однофазной сети оптимальной и достаточной является топология ОПМК, и явных причин применения двухтактных типов преобразователей, по мнению автора, нет. Главным достоинством ОПМК в качестве основы сварочного инвертора является его высокая надежность. ОПМК свободен от недостатков двухтактных конвертеров: принципиальное отсутствие возможности протекания сквозных токов через «стойку» силовых ключей и отсутствие проблемы симметрирования процесса перемагничивания магнитопровода силового трансформатора из-за существования потенциальной возможности его динамического замгничивания при работе преобразователя на такую высокодинамичную нагрузку, какой является сварочная дуга. Кроме этого, напряжение на закрытом транзисторе не превышает величины напряжения питания ОПМК, а энергия, запасаемая в паразитной индуктивности рассеивания, эффективно рекуперирована в источник питания конвертера.

По указанным причинам в качестве силовой части предлагаемого ИИСТ был выбран ОПМК с демпфирующей цепью (ДЦ) бездисипативного типа. Собственно «косой мост» представляет собой ключевые транзисторы VT1, VT2, рекуперационные диоды VD3, VD5, силовой трансформатор T2, выходной выпрямитель VD7–VD9 и дроссель выходного фильтра L2. Применение ДЦ обусловлено необходимостью снижения коммутационных потерь в силовых ключах VT1 и VT2 в момент их выключения. Включение транзисторов

происходит «мягко», с малыми ключевыми потерями благодаря затянутому фронту тока коллектора из-за наличия индуктивности рассеивания, поэтому не требуется каких-либо дополнительных мер по снижению потерь «на включение».

Демпфирующая цепь VD4–VD6–L1–C3 (рис. 1) была предложена в [2] и применялась в составе лабораторного макета ИИСТ с топологией ОПМК [3]. К достоинствам данной ДЦ можно отнести ее схемотехническую простоту и отсутствие влияния на процесс перемагничивания магнитопровода силового трансформатора, в отличие от ДЦ некоторых других распространенных типов [4]. Вторичный выпрямитель особенностей не имеет. Варистор RU3 предназначен для ограничения выбросов напряжения на выходе ИИСТ, возникающих при отрыве электрода из-за большой энергии, запасенной в дросселе L2. Индуктивность L2 выбирается исходя из величины пульсаций тока дуги при его минимальном значении. Так как систематической информации о влиянии величины пульсаций сварочного тока на параметры сварочного соединения недостаточно для определения минимальной величины L2, величина индуктивности выходного дросселя выбрана на основе анализа конструкций ИИСТ промышленного производства и компромисса между массо-габаритными показателями дросселя и величиной пульсаций на минимальном токе дуги. Расчет параметров дросселя проводился по методике, предложенной в [5], с последующим уточнением на модели силовой части в схемотехнической САПР Micro-Cap 9.

Силовой трансформатор T2 выполнен на магнитопроводе EPCOS E70/33/32 B66371 N87. Для снижения индуктивности рассеивания вторичная обмотка w2 размещена между секциями первичной обмотки w1. Индуктивность рассеивания изготовленно-

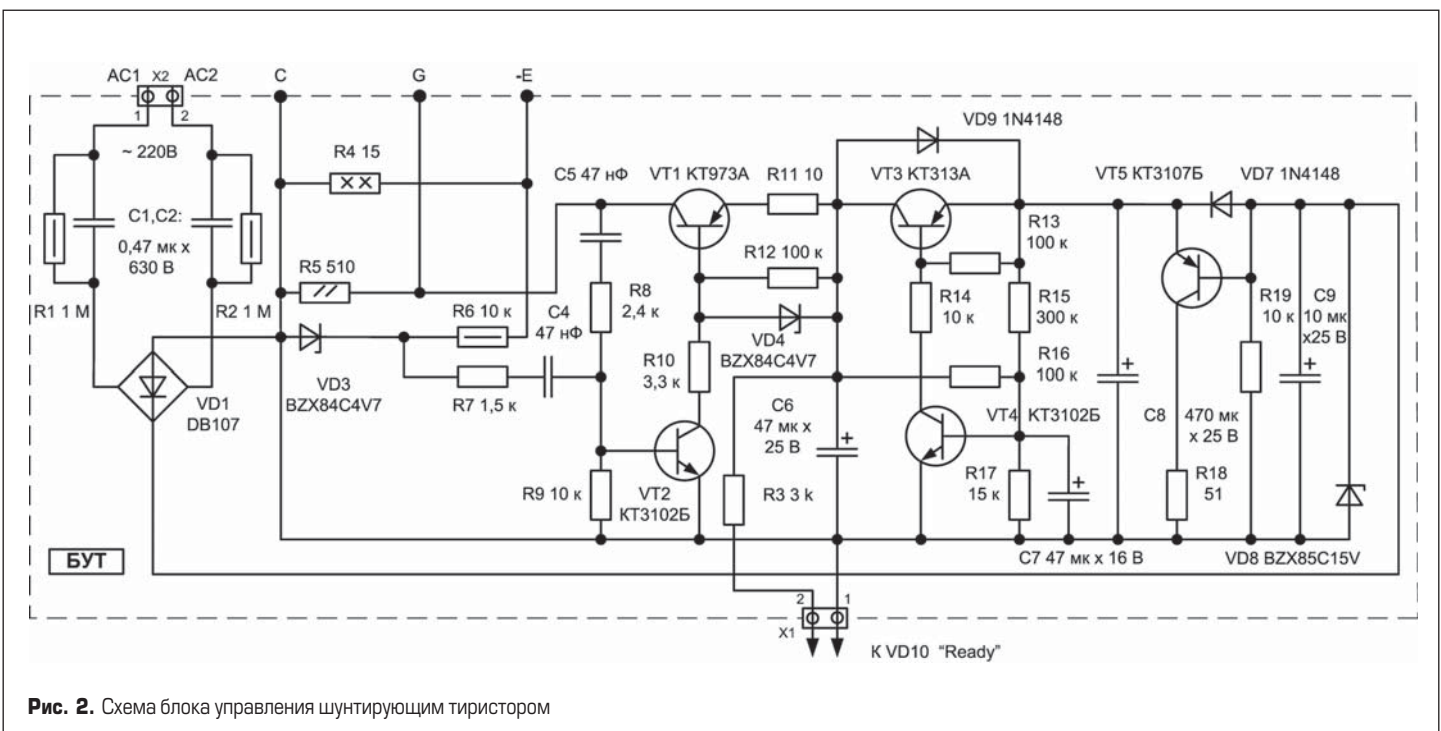


Рис. 2. Схема блока управления шунтирующим тиристором



го таким образом трансформатора составила 5 мкГн, намагничивания — 1640 мкГн. С целью снижения величины остаточной индукции сердечник собран с зазором 0,02 мм между боковыми кернами. Существует определенная специфика расчетов параметров силовых трансформаторов ИИСТ. В связи с повторно-кратковременным режимом работы сварочного инвертора и стремлением производителей максимально улучшить массо-габаритные показатели оборудования, трансформаторы в составе ИИСТ используются в форсированном режиме: с максимальной рабочей индукцией и плотностью тока в обмотках. Типичными значениями плотности тока обмоток силового трансформатора ИИСТ являются величины порядка 8–12 А/мм<sup>2</sup>, что существенно превышает аналогичный параметр силовых трансформаторов, входящих в состав ключевых источников питания непрерывного действия. По этой причине, как правило, температура трансформатора ИИСТ контролируется с помощью датчика, входящего в состав блока защиты ИИСТ от перегрева. При таком подходе к конструированию силовых трансформаторов ИИСТ теряет свой традиционный смысл понятие габаритной мощности. Трансформатор рассчитывается по критериям минимальной массы и стоимости так, чтобы в режиме принудительного охлаждения показатель продолжительности нагрузки (ПН) сварочного инвертора на максимальном токе составлял 25–35%. В состав блока А2 входит трансформатор тока Т1, предназначенный для измерения мгновенного значения тока первичной обмотки (силовых транзисторов). Напряжение с вторичной обмотки Т1 подается на плату А5 ШИМ-контроллера для организации защиты силовых ключей от перегрузки по току.

### Драйверы силовых транзисторов

В состав силового блока А2 входят драйверы транзисторов VT1 и VT2. Эта схема приведена на рис. 3. Используются интегральные драйверы с оптической развязкой между входом и выходом HCPL316J производства фирмы Avago Technologies [6]. На инвертирующий вход *-In* драйвера подается инвертированный управляющий сигнал ШИМ с выхода микросхемы TL494, расположенной на плате А5. На неинвертирующий вход *+In* подается сигнал с выхода триггера узла защиты силовых транзисторов от перегрузки по току. При штатном режиме работы на входе *+In* поддерживается постоянный высокий уровень (+5 В). С помощью параметрического стабилизатора на элементах VD9, R8, C9, C10 и VD12, R9, C14, C15 организовано псевдодвуполярное питание выходного каскада драйвера, что позволяет сформировать двуполярные импульсы управления затворами силовых транзисторов. В течение нерабочего полупериода на затворы силовых ключей подается отрицательное запирающее напряжение, равное напряжению стабилизации стабилитрона VD9 (VD12). Такой способ управления повы-

шает помехозащищенность силовых ключей по цепи затвора.

В состав микросхемы HCPL316J входит узел защиты силового транзистора от перегрузки по току, которая распознается по величине напряжения насыщения  $V_{CESAT}$ . При токовой перегрузке узел защиты драйвера выключает силовой транзистор, вместе с этим на выходе *Fault* («Авария») устанавливается активный низкий уровень. Напряжение с выхода *Fault* подается на плату А5 ШИМ-контроллера и блокирует работу микросхемы TL494. В таком состоянии драйвер будет находиться до тех пор, пока на его вход *Reset* не будет подан импульс сброса. Импульс сброса формируется локально из сигнала *Fault* с помощью одновибраторов на элементах микросхемы DD1 и подается на вход *Reset*. После сброса драйвер переходит в штатное состояние и готов принимать по входам управляющие импульсы. На выходе *Fault* устанавливается высокий уровень, с ШИМ-контроллера снимается блокировка, происходит его мягкий рестарт, и нормальный режим работы ИИСТ восстанавливается. В том случае, если после формирования сигнала *Reset* причина перегрузки не устранена, сварочный инвертор переходит в «икающий» режим работы: происходят попытки перезапуска с периодом порядка 250 мс.

### ШИМ-контроллер

Схемотехническая реализация и выбор собственно микросхемы ШИМ-контроллера зависит, прежде всего, от набора сервисных функций ИИСТ, а также способа стабилизации и регулирования сварочного тока. В профессиональных аппаратах применяется регу-

лирование по среднему значению тока нагрузки, для чего ток измеряется непосредственно в цепи нагрузки с помощью резистивного шунта либо трансдьюсера — датчика тока на эффекте Холла. Непосредственное измерение тока нагрузки позволяет получить высокую точность стабилизации тока дуги, а регулирование «по среднему» — хорошую устойчивость преобразователя в целом благодаря узкой полосе пропускания в замкнутой петле отрицательной обратной связи по току. К практическим недостаткам этого метода можно отнести высокую стоимость трансдьюсеров, поэтому в бытовых, «бюджетных» ИИСТ, как правило, используется иной подход: стабилизация тока дуги по максимальному, амплитудному значению тока первичной обмотки. Измерение тока ключей производится с помощью обычного трансформатора тока, для управления ключами применяются ШИМ-контроллеры с «токовым режимом» (current mode PWM controller), например, такие как UC384х. При таком способе регулирования не удается получить крутопадающую статическую ВАХ (что, впрочем, не обязательно для «бюджетного» ИИСТ), ток короткого замыкания ИИСТ может существенно превышать ток задания из-за достаточно большой задержки распространения сигнала в цепи токовой отрицательной обратной связи (ООС) и ненулевого значения тока намагничивания силового трансформатора, а также пульсаций выходного дросселя [7]. Амплитудное значение тока ключей (первичной обмотки) должно контролироваться блоком управления силовой частью практически непрерывно (в идеальном случае), что требует широкой полосы пропускания по цепи токовой ООС, а это затрудняет получение устойчивой рабо-

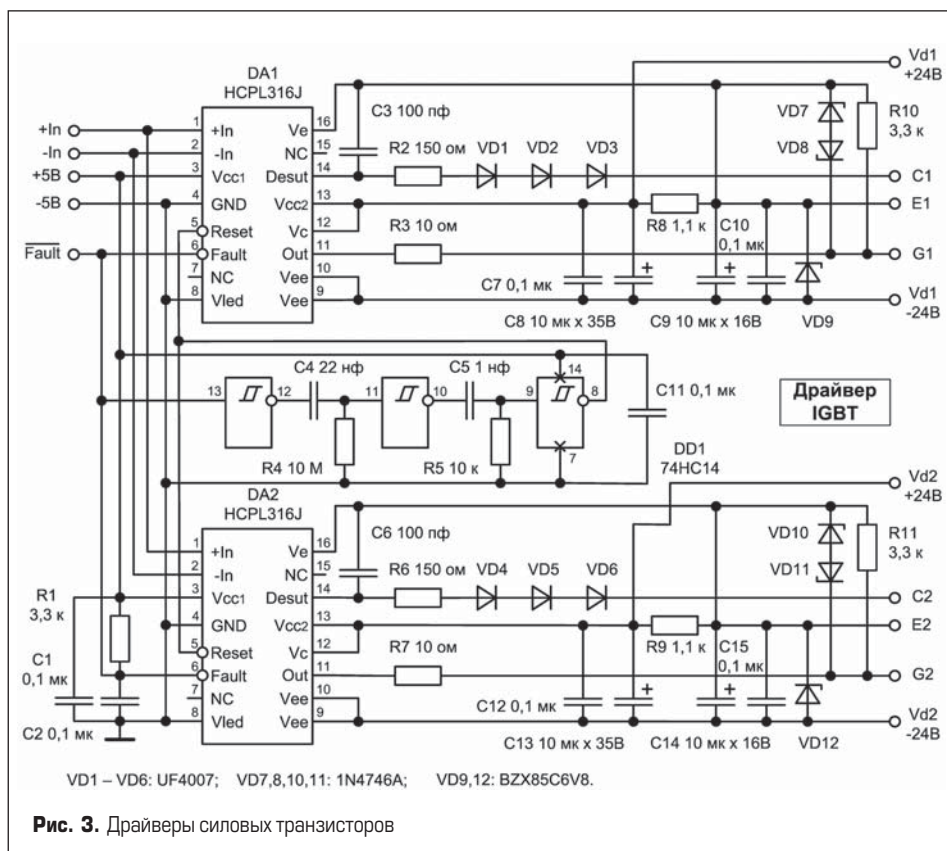


Рис. 3. Драйверы силовых транзисторов

ты преобразователя. При стабилизации амплитудного значения тока первичной обмотки ОПМК преобразователь работает в режиме внутренней петли ООС и, строго говоря, «не совсем точно знает», что происходит с током нагрузки. В качестве примера ИИСТ с подобным способом регулирования тока дуги можно привести сварочный инвертор ESAB Caddy LHO 150, однако дальнейшего развития это направление в изделиях ESAB не получило. Тем не менее значительное количество малоизвестных производителей ИИСТ из Юго-Восточной Азии широко применяют такой способ регулирования тока в своих «бюджетных» инверторах, что оправдано для оборудования этого класса.

В предлагаемом ИИСТ реализован способ регулирования по среднему току нагрузки, для измерения которого используется датчик тока с элементом Холла CSLA1DG производства фирмы Honeywell [8]. Данный датчик имеет выход по напряжению, однополярное питание, удовлетворительные точностные параметры и быстродействие и относится к категории недорогих трансдюсеров. В отсутствие измеряемого тока на выходе датчика устанавливается напряжение, равное половине напряжения питания, типовое значение крутизны составляет 13 мВ/А, кроме этого обе-

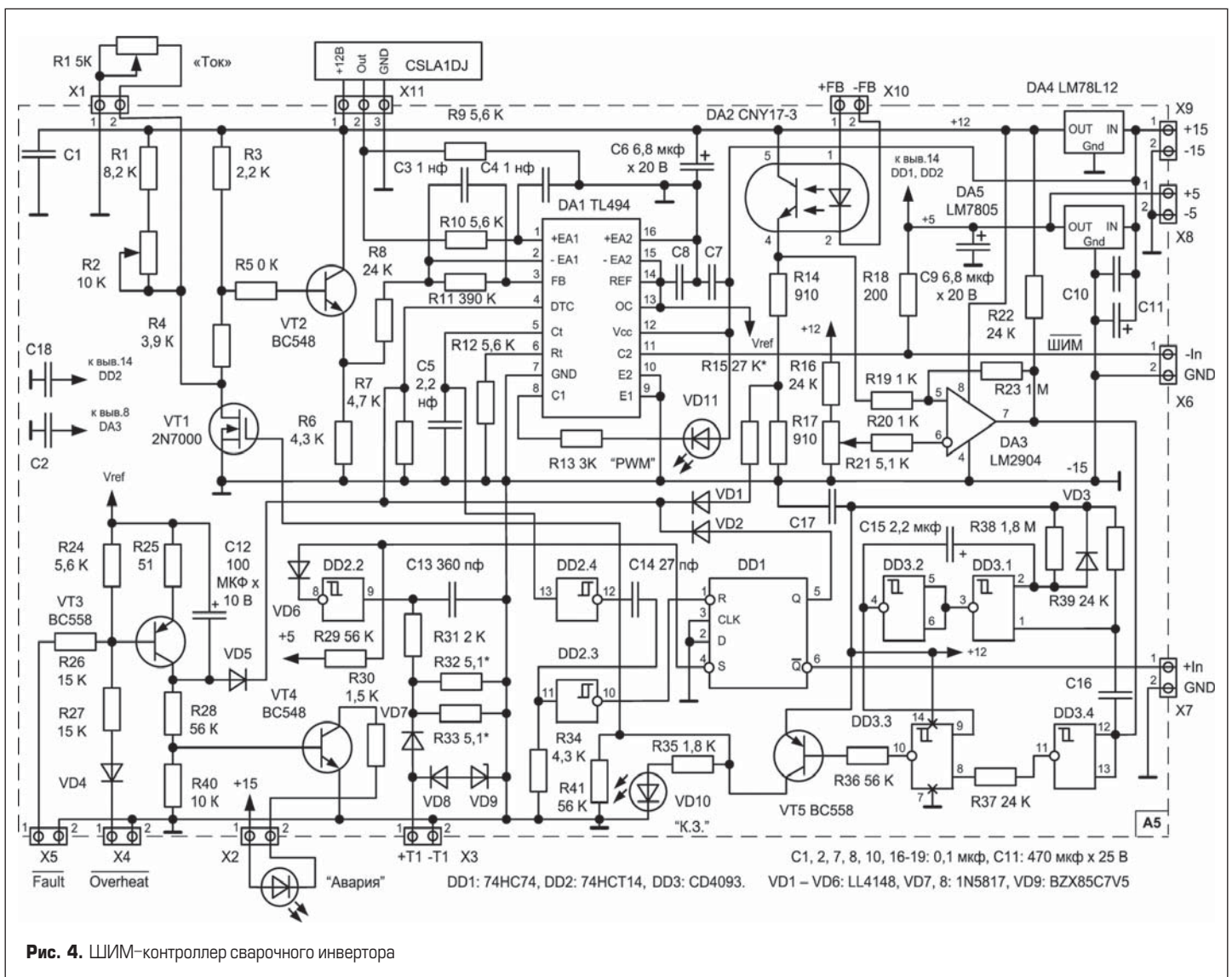
спечивается гальваническая развязка между измеряемой цепью и выходом датчика.

Схема ШИМ-контроллера приведена на рис. 4. Сигнал, пропорциональный току нагрузки, с выхода датчика CS1 подается на неинвертирующий вход усилителя ошибки микросхемы DA1. На инвертирующий вход подается опорное напряжение с эмиттерного повторителя VT2. Само опорное напряжение формируется резистивным делителем R1–R4 и внешним переменным резистором R1 «Ток» (рис. 1). Частота коммутации силовых транзисторов составляет 43 кГц. Вход DTC используется для: а) блокировки DA1 при поступлении сигнала *Fault* от драйвера силового транзистора блока А2 либо сигнала *Overheat* («Перегрев») с платы А4 блока термодатчика; б) для организации обратной связи по выходному напряжению; в) для плавного запуска силовой части ИИСТ при его включении в сеть 220 В либо перезапуска после снятия сигнала *Fault* или *Overheat*.

Сигнал *Fault* (или *Overheat*) с низким активным уровнем открывает ключ VT3, вследствие чего конденсатор C12 быстро разряжается, открывается ключ VT4, включается светодиод VD11 «Авария» на передней панели аппарата, и на вход DTC микросхемы DA1 подается напряжение  $V_{REF}$ . В результате этого DA1 пере-

стает вырабатывать управляющие импульсы, и на ее выходе C2 устанавливается постоянный уровень +5 В. При возврате уровня сигнала *Fault* или *Overheat* к нормальному значению +5 В транзистор VT3 закрывается, конденсатор C12 медленно заряжается через резистор R7, напряжение на входе DTC плавно снижается до нуля, и на выходе C2 восстанавливаются импульсы инвертированной ШИМ с плавно нарастающим коэффициентом заполнения D до максимально возможного  $D_{MAX} = 0,45$ . Светодиод «Авария» выключается.

Обратная связь по выходному напряжению организована с помощью оптрона DA2. На вход DA2 через соединитель X10 подается ток, пропорциональный величине выходного напряжения ИИСТ, который формируется с помощью элементов R32–R34 и C12, расположенными на плате А4. В результате действия данной петли ООС по выходному напряжению ограничивается размах индукции в магнитопроводе силового трансформатора на холостом ходу и детектируется состояние короткого замыкания (КЗ) в нагрузке. Нагрузка считается короткозамкнутой, если напряжение на выходных разъемах ИИСТ становится ниже 9 В. В этом случае напряжение на выходе компаратора K3 DA3 уменьшается до нуля, и спадом этого на-





пряжения запускается схема формирования паузы на микросхеме DD3. Время задержки задается элементами R38 и C15 и составляет порядка двух секунд. По истечении времени паузы VT1 открывается, шунтирует регулятор тока R1, на опорный вход DA1 подается фиксированное напряжение с делителя R3, R4, величина которого соответствует минимальному току нагрузки 15 А. После снятия K3 состояния выходов DA3 и DD3 возвращаются к исходным значениям, транзистор VT1 закрывается, и ИИСТ снова работает в соответствии с заданием по току нагрузки, определяемым резистором R1 «Ток».

Последний узел, входящий в состав блока A5, — схема ограничения тока коллектора силовых транзисторов. Датчиком тока силовых транзисторов является трансформатор тока T1 блока A2. Напряжение с вторичной обмот-

ки T1 через соединитель X3 и выпрямитель на диоде VD7 подается на токоизмерительные резисторы R32, R33. Напряжение с R32, R33 поступает на вход триггера Шмидта DD2.2, который используется в качестве быстродействующего компаратора с фиксированным пороговым напряжением, равным 1,5 В. При указанных на схеме номиналах резисторов R32 и R33 напряжение на них достигает порогового значения при амплитудном значении тока силовых транзисторов порядка 60 А. В этом случае выход DD2.2 переключается в состояние с низким уровнем, который поступает на вход установки триггера DD1. На выходе Q триггера DD1 устанавливается высокий уровень, который через диод VD2 поступает на вход DTC микросхемы DA1, в результате чего DA1 блокируется. Одновременно с этим сигнал низкого логического уровня с инверс-

ного выхода DD1 поступает на вход +In обоих драйверов HCPL316J и блокирует их работу. В конце каждого полупериода рабочей частоты триггер DD1 возвращается в исходное состояние импульсом сброса по входу R. Импульс сброса длительностью 0,7 мкс формируется из напряжения «пилы» с вывода Ct микросхемы DA1 с помощью одновибратора на элементах DD23, DD2.4. Таким образом, работа схемы ограничения синхронизируется с последовательностью управляющих импульсов микросхемы DA1 и, фактически, является функциональным аналогом блока токового компаратора, входящего в состав микросхем серии UC384x и отсутствующего в составе TL494.

**Блок термоконтроля**

Блок термоконтроля (БТК) обеспечивает защиту силовых ключевых элементов и силового трансформатора от перегрева, управляет работой вентиляторов охлаждения и содержит часть схемы ООС по напряжению на нагрузке. Схема БТК приведена на рис. 5.

Датчик температуры K1 биметаллического типа с фиксированной температурой срабатывания +75 °C установлен на силовом трансформаторе T2. Интегральный датчик DA1 контролирует температуру радиатора охлаждения силовых транзисторов, на котором также размещены тиристор TY1 и входной выпрямитель VD1, VD2. Датчик DA3 установлен на втором радиаторе с диодами вторичного выпрямителя VD7–VD9. Пороги срабатывания компараторов термозащиты DA2.1 и DA2.2 выбраны равными +65 °C для радиатора силовых транзисторов и +75 °C для радиатора со вторичным выпрямителем. Компаратор DA4.2 изменяет свое состояние при температуре радиатора силовых транзисторов +40 °C и предназначен для управления вентиляторами. Вентиляторы работают в двух случаях: температура радиатора с датчиком DA1 больше +40 °C или на выходе ИИСТ есть нагрузка (выходное напряжение ниже 30 В). Напряжение для организации ООС по выходному напряжению поступает на соединитель X1 и далее подается на плату ШИМ-контроллера A5.

**Блок питания ИИСТ**

Напряжения, необходимые для питания ШИМ-контроллера, драйверов IGBT и блока БТК, получаются с помощью маломощного блока питания (БП) A3, показанного на рис. 6. Блок A3 представляет собой обратноточковой преобразователь с управляющей микросхемой CS3842. Микросхема DA2 используется в типовом включении с внутренней ООС по току ключа VT1. ООС по напряжению также организована традиционным способом с помощью DA1 и DA5: стабилизируется напряжение канала +15 В как самого нагруженного. БП имеет три гальванически развязанных выхода: +15 В/1,5 А и два канала по +24 В/0,1 А. Трансформатор T1 выполнен на сердечни-

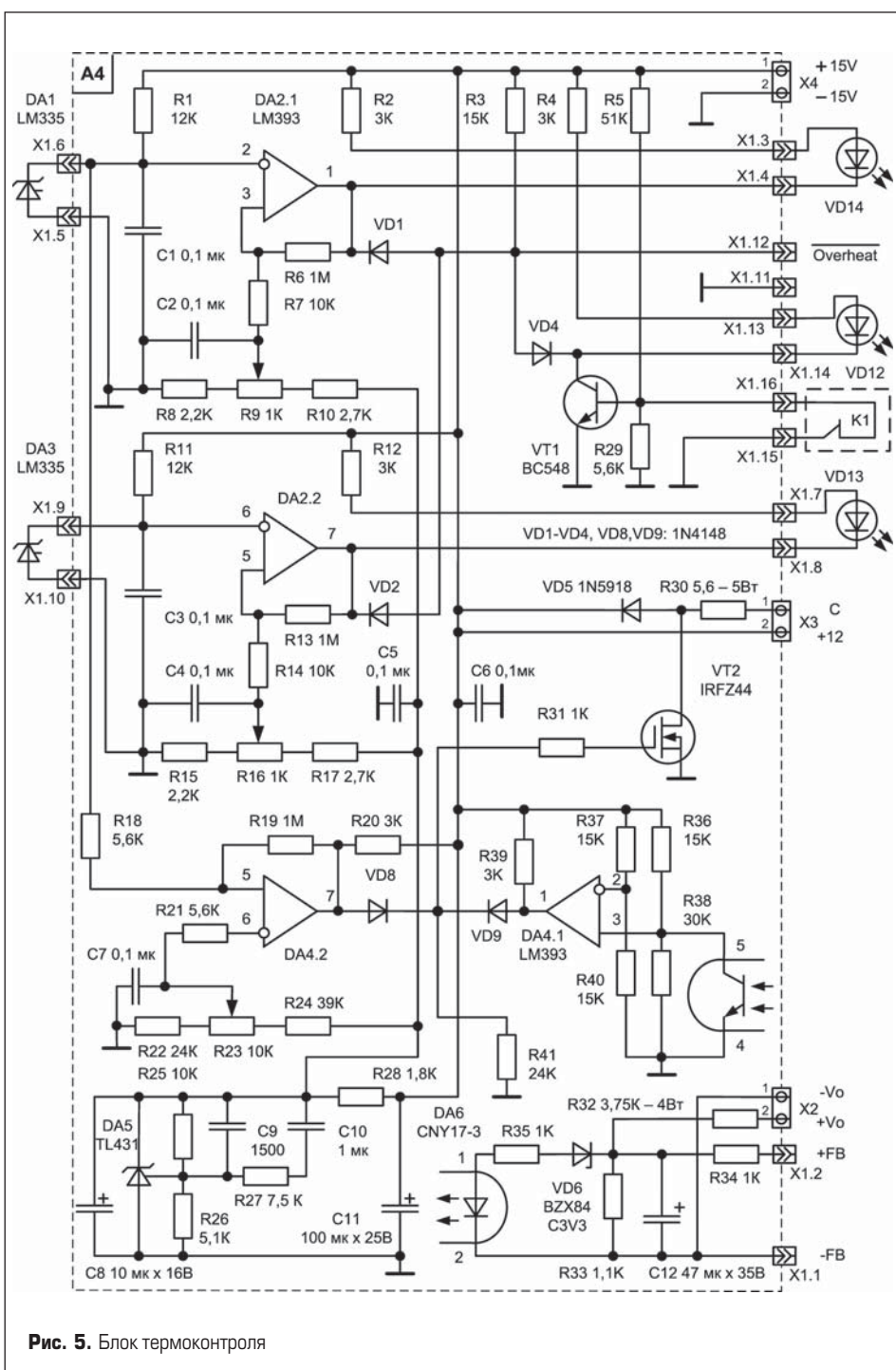


Рис. 5. Блок термоконтроля

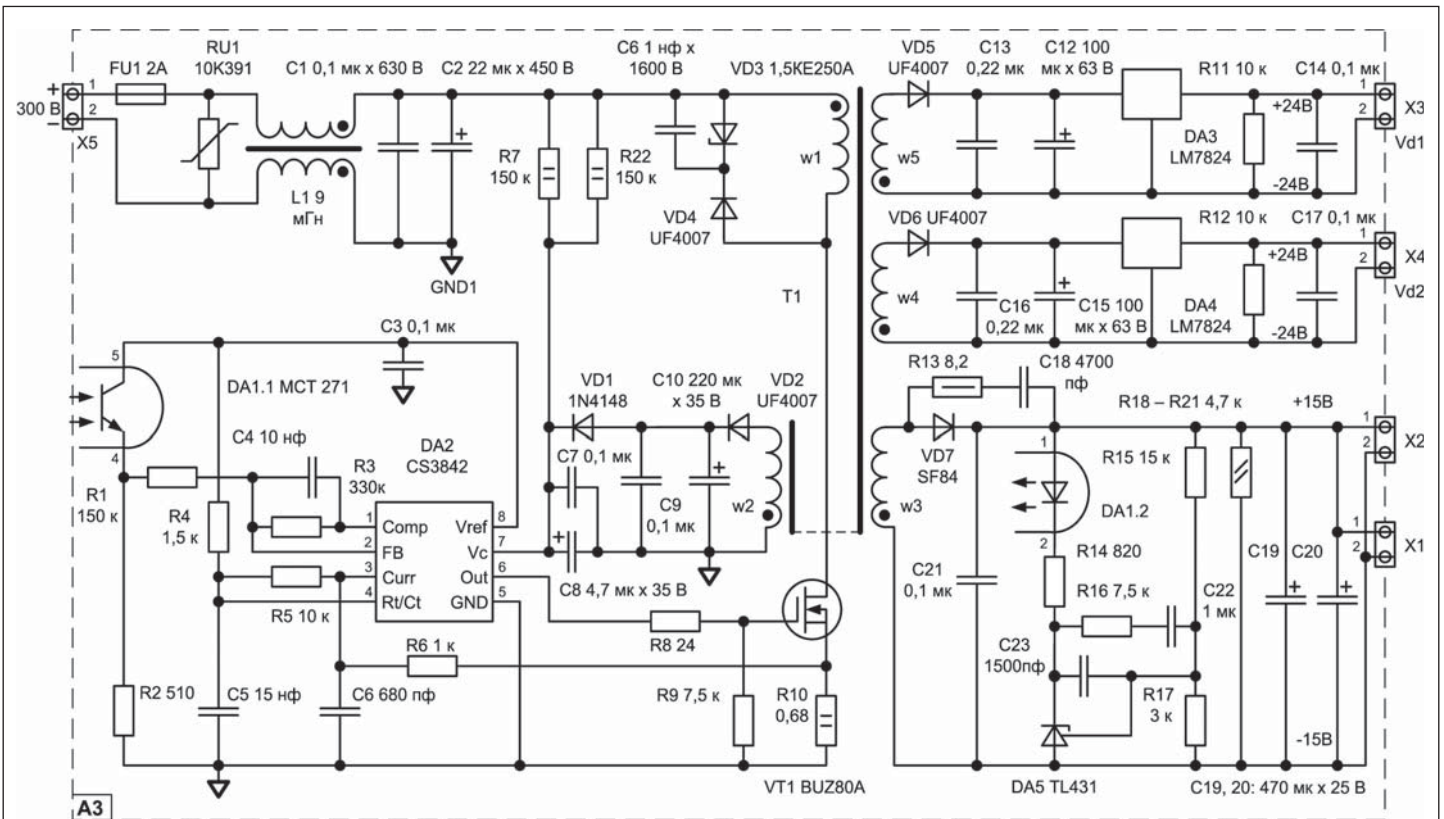


Рис. 6. Блок питания инвертора

ке EPCOS ETD29/16/10 B66358 N27, который собран с зазором между боковыми кернами 0,08 мм. Индуктивность намагничивания первичной обмотки равна 1400 мкГн, индуктивность рассеивания наиболее нагруженной обмотки w3, приведенная к первичной обмотке w1, составляет 30 мкГн. Рабочая частота преобразователя 60 кГц. Блок питания запускается при напряжении на входе (соединитель X5) +150 В и сохраняет свои параметры до величины выпрямленного сетевого напряжения +70 В.

На рис. 7 приведены характерные осциллограммы тока и напряжения силового транзистора VT1 на холостом ходу. В начале рабочего полупериода хорошо виден импульс тока перезарядки конденсатора C3 демпфирующей цепи и далее — ток намагничивания первичной обмотки T2. На рис. 8

показан импульс тока коллектора VT1 при токе нагрузки 150 А, напряжение коллектор-эмиттер и кривая мгновенной мощности потерь, рассеиваемая транзистором. Виден «мягкий» характер включения VT1 благодаря наличию индуктивности рассеивания трансформатора T2. Выключение происходит более «жестко», но с допустимым уровнем пиковой мощности. Осциллограмма на рис. 9 представляет собой импульсы тока, потребляемого инвертором от питающей сети 220 В/50 Гц при токе нагрузки 150 А (резистивная нагрузка сопротивлением 0,12 Ом). Форма импульсов тока на рис. 9 характерна для выпрямителя с емкостным фильтром и является следствием низкого коэффициента мощности ИИСТ.

Конструктивно представленный ИИСТ выполнен в металлическом корпусе из двух

Π-образных частей, одна из которых является несущим основанием, а вторая — съемным кожухом. Несущая часть, в которой установлены все элементы инвертора, разделена на два отсека горизонтальной перегородкой. В нижней части, охлаждаемой вентиляторами, размещены радиаторы силовых ключей, силовой трансформатор, выходной дроссель, конденсаторы входного фильтра, датчик тока CS1 и плата БУТ блока А1. Остальная слаботочная часть ИИСТ размещена в верхней части корпуса и не подвержена загрязнению в результате работы вентиляторов. Внешний вид ИИСТ показан на рис. 10 и 11.

**Закключение**

Рассмотренные в статье схемотехнические и конструктивные решения являются не един-

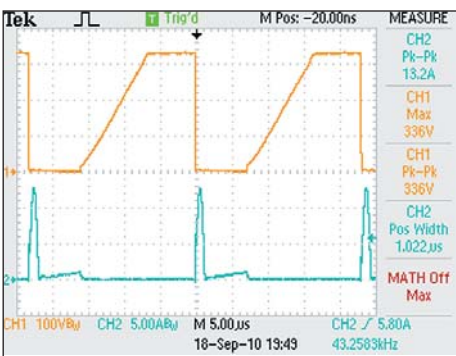


Рис. 7. Ток (CH2) и напряжение (CH1) силового транзистора VT1 блока А2 на холостом ходу

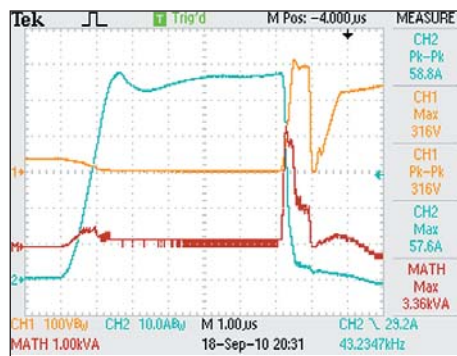


Рис. 8. Ток (CH2), напряжение (CH1) и мгновенная мощность (MATH) транзистора VT1 блока А2 при токе нагрузки 150 А

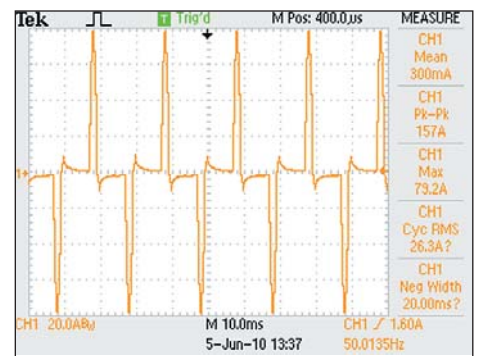


Рис. 9. Форма тока, потребляемого ИИСТ от сети 220 В/ 50 Гц при токе нагрузки 150 А

ственно возможными при разработке сварочного инвертора начального уровня и представлены в качестве примера практической реализации. Возможно дальнейшее развитие данного ИИСТ как в сторону «бюджетности» за счет максимального упрощения и удешевления конструкции, так и в сторону увеличения функциональной насыщенности, применения более современной и «удобной» элементной базы, иной, возможно более эффективной, схемотехники. Например, все блоки управления работой ИИСТ могут быть выполнены в виде одного узла на основе подходящего микроконтроллера или цифрового сигнального процессора. Использование силовых ключевых элементов в промышленных корпусах SOT227, ISOTOP либо применение силовых модулей с интегрированными драйверами и системой защиты от перегрузки по току и перегрева позволило бы сделать конструктив ИИСТ более простым и технологичным.

### Литература

1. Эраносян С. А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение. 1991.
2. Treviso C. H. G., Pereira A. A., Farias V. J., Vieira J. B., de Freitas L. C.. A 1,5 kW operation with 90% efficiency of a two transistors forward converter with non-dissipative snubber. PESC'98 Record. Vol.3. 1998.



Рис. 10. Вид спереди



Рис. 11. Вид сзади

3. Dudrik J., Bauer P. DC source for arc welding with soft-switching current-mode controlled DC-DC converter. IREE. 2006.
4. Петров С. Однотактный прямоходовой мостовой конвертер: области применения и развитие схемотехники // Силавая электроника. 2009. № 5.
5. Пентегов И. В., Мещеряк С. Н., Турты М. В., Рымар С. В. Методика расчета дросселей входного и выходного фильтров сварочных инверторных источников питания при использовании стандартных магни-

топроводов // Автоматическая сварка. 1997. № 4.

6. [http://www.avagotech.com/pages/en/optocouplers\\_plastic/plastic\\_integrated\\_gate\\_drive\\_optocoupler/hcpl-316j/](http://www.avagotech.com/pages/en/optocouplers_plastic/plastic_integrated_gate_drive_optocoupler/hcpl-316j/)
7. Martinez A, Blasco N., Perez F. J., Vicuna J. E., Lacamara J., Oliva J. A. Static output characteristic of a pick current controlled arc welding machine. IEEE 49<sup>th</sup> International Midwest symposium on circuits and systems. Vol.1. 2006.
8. [http://sensing.honeywell.com/index.cfm?ci\\_id=140404](http://sensing.honeywell.com/index.cfm?ci_id=140404)