

Сварочный полумостовой инвертор с емкостным балластным сопротивлением

Автор qaki@yandex.ru

Среди любителей самодельных сварочных инверторов наибольшей популярностью пользуются прямоходы типа Бармалейника и резонансные мосты или полумосты по Негуляевскому прототипу. В обоих вариантах присутствует весьма важная и часто доставляющая немалые хлопоты деталь - дроссель. В Бармалейнике дроссель является неотъемлемой частью выхода и должен обеспечивать сглаживание прерывистой подачи сварочного тока. В Негуляевском резонанснике дроссель служит индуктивным элементом резонансного контура и помимо обеспечения синхронизации моментов коммутации с нулевым значением контурного тока обеспечивает также расстройку контура для ограничения максимального значения тока в режиме КЗ. Специфическая роль дроссельных элементов в обеих топологиях порождает весьма серьезные требования к ним. В особой степени это проявляется в резонансниках, где настройка дросселя нередко превращается в мучительную процедуру подбора оптимального числа витков и зазора в сердечнике.

Вместе с тем имеется принципиальная возможность построить сварочный инвертор с требуемыми характеристиками без применения дроссельных элементов, что позволяет существенно упростить конструкцию и улучшить массо-габаритные характеристики. Основой для этого может служить применение емкостного балластного сопротивления в мостовых и полумостовых топологиях инвертора. Такое схемное построение имеет естественное ограничение тока КЗ, существенно снижает потери на выключение и благодаря двухтактному выпрямлению выходного тока позволяет выйти на приемлемый уровень пульсаций тока дуги только за счет собственной индуктивности сварочных проводов. С целью проверки реальной возможности использования данной топологии был построен действующий макет полумостового сварочного инвертора на максимальный ток дуги порядка 140-150 А. Более детально подробности схемного построения макета рассмотрены ниже.

1. Функциональная схема макета сварочного инвертора

Функциональная схема инвертора представлена на рис. 1.

Особенностью функциональной схемы рассматриваемого инвертора является наличие в нем двух одновременно работающих инверторов - маломощного, служащего для обеспечения горячего старта и после поджига дуги работающего в качестве источника пилот-сигнала, и силового, питающего дугу сварочным током. Эта особенность нашла свое выражение в соответствующем делении устройства на составные части и взаимодействии их.

В состав инвертора входят:

- база;
- блок питания слаботочных цепей;
- модуль включения инвертора;
- модуль управления силовыми ключами;
- модуль инвертора горячего старта.

База в конструктивном и схемном плане является основным силовым узлом инвертора и выполняет следующие функции:

- выпрямление напряжения сети ~220 В 50 Гц для получения напряжения постоянного тока, питающего силовой инвертор и инвертор горячего старта;

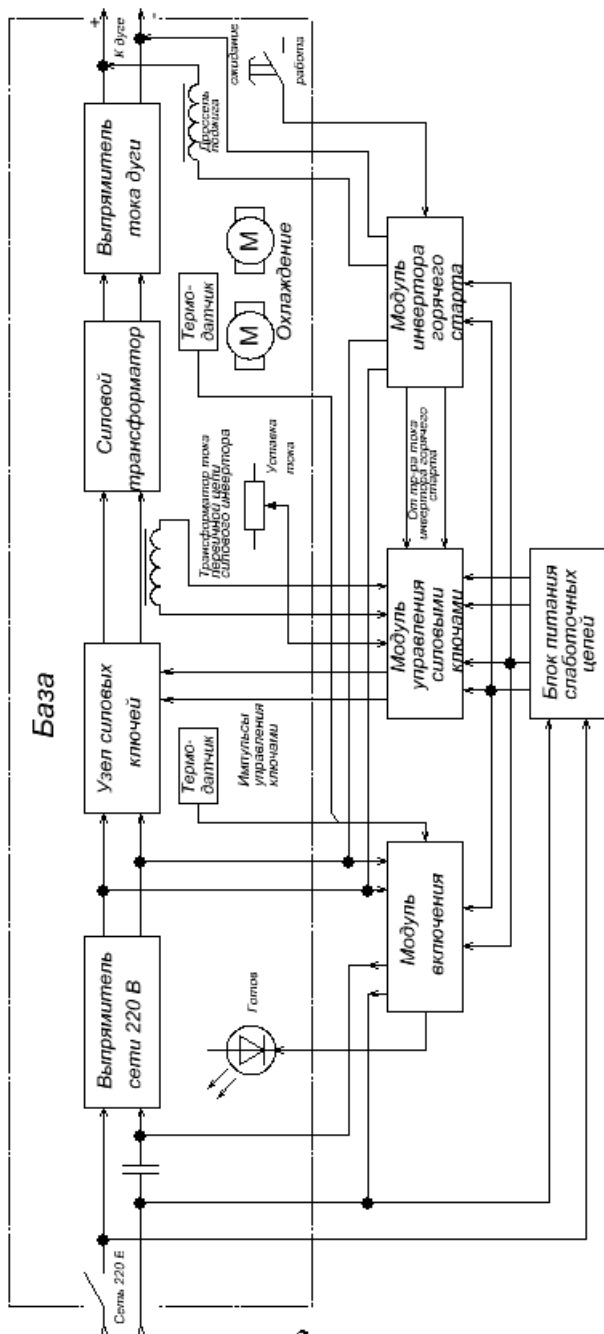


Рис.1 Функциональная схема сварочного инвертора

- преобразование (инвертирование) выпрямленного напряжения в высокочастотное напряжение частотой 40 кГц или выше;
- первичное формирование падающей внешней ВАХ сварочного источника;
- трансформация напряжения и тока первичного контура инвертора для получения требуемых значений напряжения холостого хода на выходе и сварочного тока дуги;
- выпрямление высокочастотного напряжения вторичной обмотки силового трансформатора для получения напряжения постоянного тока, питающего сварочную дугу, с обеспечением защиты силовых диодов от опасных перенапряжений в переходных режимах;
- обеспечение охлаждения тепловыделяющих элементов и термоконтроль наиболее подверженных перегреву ПП приборов,
- размещение элементов управления и отображения технического состояния сварочника, а также приборных гнезд и разъема для подключения сварочных проводов и сетевого кабеля.

Блок питания слаботочных цепей служит для выработки стабилизированного напряжения 15 В, привязанного минусовым полюсом к общему минусовому проводу, которое используется для питания перечисленных выше модулей, а также стабилизированного напряжения 15 В, не имеющего привязки к общему минусу (так называемый плавающий источник).

Модуль включения инвертора предназначен для ограничения пускового тока при включении инвертора в сеть, контроля достаточности напряжения питающей сети для нормальной работы инвертора, а также для автоматического перехода в безопасный режим при срабатывании термодатчиков или при возникновении критической ситуации по перегрузке недопустимым сварочным током (не путать с током короткого замыкания).

Основным назначением модуля управления силовыми ключами является формирование двух импульсных последовательностей, попеременно открывающих при наличии разрешающего потенциала верхний и нижний ключи полумоста. Признаком для выработки разрешающего потенциала служит наличие тока дуги горячего старта. В этом смысле ток поджига играет роль пилот-сигнала, управляющего работой силового инвертора. Так как ток цепи горячего старта при горении стартовой дуги и при КЗ в этой цепи существенно различается, то имеется потенциальная возможность использовать это различие для введения двупороговой логики, реализующей диагностику режима КЗ и снятие возбуждения для защиты силового инвертора. На данном этапе эта возможность не прорабатывалась. На модуль управления также возложена функция автоматического поддержания заданной величины сварочного тока. Эта функция реализуется путем оценки величины тока в цепи первичной обмотки силового трансформатора основного инвертора и последующего сравнения с напряжением уставки для выработки управляющего воздействия, изменяющего длительность импульсов открывания ключей (ШИМ). Модуль управления ключами также решает задачу задержки момента включения сварочной дуги по отношению к моменту зажигания стартовой дуги. Это дает возможность существенно снизить вероятность прилипания электрода в момент поджига, так как маломощная стартовая дуга не дает прочного соединения металла электрода с основным и место спекания легко разрушается небольшим усилием руки,двигающей электрод по поверхности свариваемой детали для зажигания дуги. В наибольшей степени эффект мягкого поджига проявляется при совместном подборе времени задержки и силы стартового тока, учитывающем психофизические особенности действий сварщика.

Модуль горячего старта служит для выработки напряжения питания маломощной стартовой дуги, предваряющей запуск основной сварочной дуги. Модуль горячего старта как источник питания дуговой нагрузки должен обеспечивать падающую внешнюю ВАХ. Кроме того на этот модуль, учитывая его завязку с основным силовым трактом, возложена задача управления переходом из режима "ожидание" в режим "работа" и обратно. В

режиме "ожидание" напряжение на выходе сварочника отсутствует, так как задающий генератор модуля горячего старта заблокирован. Тем не менее аппарат полностью готов к работе. В режиме "работа" задающий генератор разблокирован и на выходе присутствует напряжение постоянного тока около 100 В.

Функционирование сварочника происходит следующим образом. После подачи напряжения сети 220 В начинается заряд электролитических конденсаторов выпрямителя, питающего силовой инвертор и инвертор горячего старта. Для снижения величины броска тока включения последовательно с выпрямительным мостиком включен токоограничивающий конденсатор. Одновременно запускается блок питания. В модуле включения напряжение на электролитах сравнивается с опорным и по достижении значения 240-250 В происходит замыкание токоограничивающего конденсатора контактами реле, после чего фильтровые конденсаторы заряжаются полностью. Если напряжение сети мало и требуемое значение не получено, токоограничивающий конденсатор не позволяет использовать аппарат по назначению, оставляя его включенном в безопасном режиме. Размыкание контактов реле с переходом в безопасный режим может произойти также и в случае чрезмерного тока дуги.

С появлением напряжения питания +15 В происходит запуск задающего генератора (ЗГ) на микросхеме TL494 в модуле управления силовыми ключами. Выходные импульсы ЗГ поступают на полумостовой драйвер. Однако на выходе драйвера сигналы управления ключами могут появиться только при наличии разрешающего потенциала на выходе компаратора, оценивающего величину тока поджига дуги. Кроме этого аппарат должен быть переведен из режима ожидания в режим работа. Если тока поджига нет, то компаратор вырабатывает блокирующий потенциал. Другой особенностью модуля управления силовыми ключами является наличие в нем исполнительной части петли отрицательной обратной связи (ООС) по току. Как указывалось выше, действие ООС основано на сравнении напряжения на выходе детектора тока первичной обмотки силового трансформатора с напряжением уставки. В отсутствии тока дуги в первичной обмотке протекает только ток намагничивания, величина которого мала и не может создать напряжения, превышающего область "пятки" выпрямительных диодов. При этом напряжение на выходе детектора около нуля.

При задании любого напряжения уставки, в т.ч. нулевого в операционном усилителе TL494 происходит усиление разности напряжений уставки и детектора тока. При двух нулях на входе операционника его выходное напряжение стремится к нулю. Топология TL494 такова, что нулю на выходе операционника соответствует максимальная длительность выходных импульсов. Если теперь напряжение уставки тока повысить, то операционный усилитель входит в режим насыщения и его выходное напряжение по-прежнему стремится к нулю. Таким образом, в отсутствии сигналов на выходе детектора тока первичной обмотки силового трансформатора длительность импульсов на выходе TL494 всегда максимальна и не зависит от положения регулятора уставки тока. С появлением сигнала упомянутого детектора операционный усилитель выходит из насыщения и начинается процесс регулирования длительности импульсов (ШИМ) для достижения заданного значения тока на выходе (предполагается, что среднее значение выпрямленного тока первичной обмотки прямо пропорционально выходному току инвертора). В режиме ожидания выбранная схема ООС держит инвертор в состоянии готовности к отдаче максимального тока, снижая ее до заданного уровня при появлении тока нагрузки.

Окончательное формирование сигналов управления ключами производится с помощью полумостового драйвера IR2110, имеющего два выхода, открывающих верхний и нижний ключи. Для питания выхода верхнего ключа используется отдельный плавающий источник +15 В. Микросхема IR2110 имеет управляющий вход, блокирующий выдачу выходных сигналов. По этому входу производится управление включением силового инвертора в соответствие с алгоритмом горячего старта, т.е. последовательно:

касание электродом – обнаружение зажигания маломощной дуги по возникновению тока ее горения – небольшая временная задержка для придания электроду правильного положения по отношению к свариваемым деталям без прилипания – включение силового инвертора на выдачу сварочного тока. Если попытка зажечь дугу закончилась неудачей и электрод прилип, что по существу является коротким замыканием сварочной цепи, то действие ООС ограничит величину тока КЗ безопасным значением.

Характер функционирования модуля горячего старта зависит от положения кнопки с фиксированием SB1-2. При отжатой кнопке, что соответствует режиму “ожидание”, задающий генератор микросхемы IR2153 заблокирован и напряжение на выходе модуля отсутствует. При нажатой кнопке – режим “работа” – блокировка снимается, задающий генератор начинает вырабатывать пилообразное напряжение с частотой около 100 кГц, из которого затем формируются управляющие сигналы для ключей маломощного инвертора. В результате после выпрямления переменного тока с частотой около 50 кГц на выходе модуля появляется напряжение постоянного тока величиной 100-105 В, которое используется для зажигания дуги горячего старта.

Основным содержанием функционирования базы является работа в качестве силового инвертора, вырабатывающего напряжение постоянного тока, питающего сварочную дугу. Это достигается путем подачи импульсов управления на затворы силовых ключей IRGP4063D и последующим выпрямлением напряжения на вторичной обмотке силового трансформатора с помощью диодов 150EBU04. Как отмечалось выше, подача импульсов управления происходит только при наличии тока в цепи горячего старта.

Помимо этого база обеспечивает выпрямление сетевого напряжения 220 В для питания силового инвертора и инвертора горячего старта. Управление процессом начального заряда конденсаторов сетевого фильтра осуществляет модуль включения. Важной функцией базы является обеспечение охлаждения тепловыделяющих компонентов. Для этого используются два вентилятора 80*80*25 мм, расположенных на передней и задней панели. Номинальное напряжение питания вентиляторов 12 В при токе 0,18-0,2 А. Но для повышения производительности и улучшения теплоотвода вентиляторы постоянно подключены к источнику +15 В. Вентилятор передней панели работает как нагнетающий и подает холодный воздух на радиаторы диодов 150EBU04 и IGBT IRGP4063D. Вентилятор задней панели работает как вытяжной, благодаря чему создается устойчивое движение воздуха по всему объему аппарата. Для контроля перегрева радиаторов на них установлены датчики с температурой срабатывания 70°С. При срабатывании датчиков происходит размыкание контактов реле, закорачивающих токоограничительный конденсатор, и аппарат переходит в режим безопасной токовой нагрузки для понижения температуры ПП приборов.

Отображение технического состояния “включен – выключен” осуществляется подсветом клавиша выключателя сети. Готовность аппарата по выпрямленному напряжению сети отображается свечением светодиода на передней панели. Отсутствие его свечения в ранее нагруженном аппарате свидетельствует о перегреве радиаторов ПП приборов и соответственно самих приборов.

На передней панели размещены также переменный резистор, служащий для уставки величины сварочного тока, и кнопка с фиксацией для перевода аппарата из режима ожидания в режим работа.

2. Электрическая схема инвертора

2.1 Электрическая схема базы

2.1.1 Описание электрической схемы базы

Электрическая схемы базы представлена на рис. 2. Основным функциональным звеном

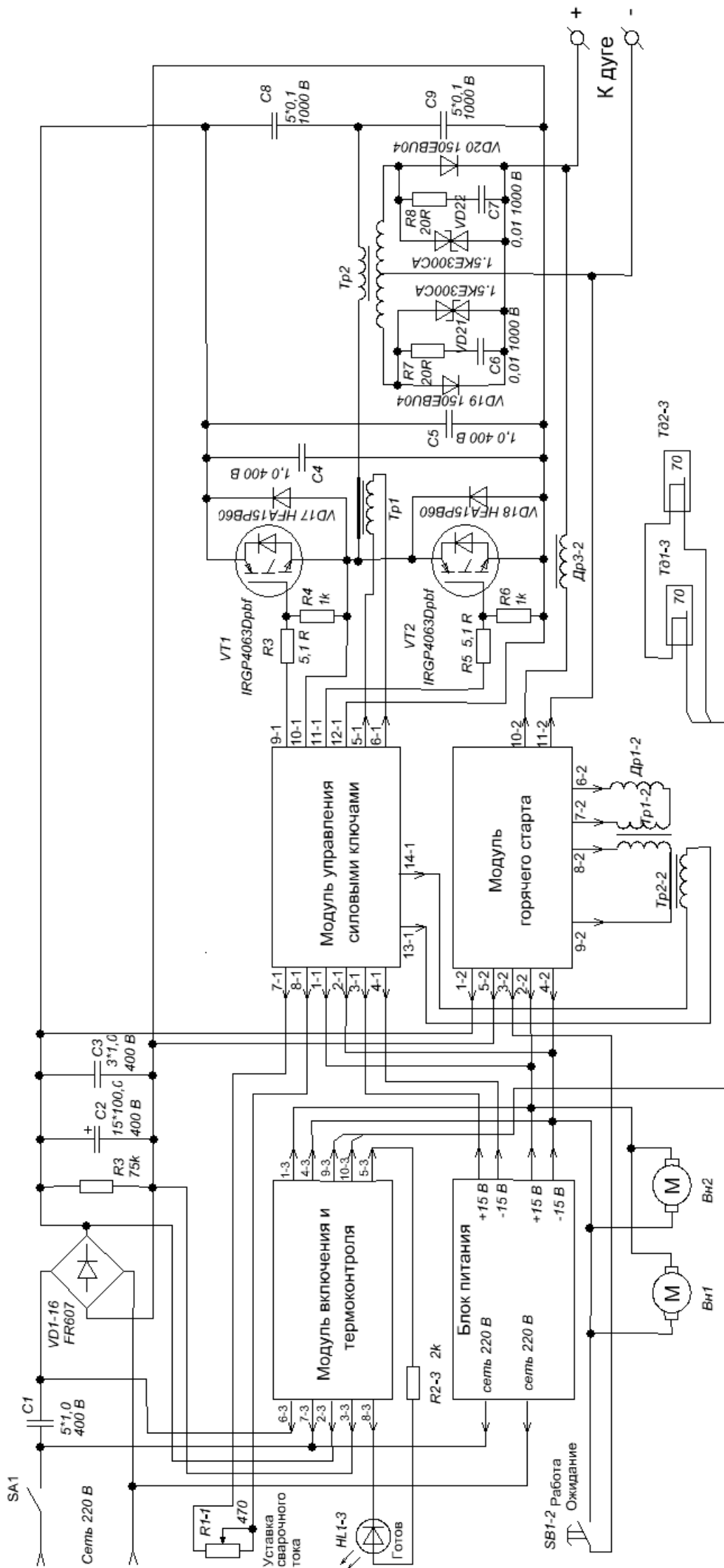


Рис. 2 Электрическая схема базы

базы является полумостовой инвертор с емкостным балластным сопротивлением. Активную ветвь образуют два ключевых элемента на IGBT IRGP4063D (VT1,VT2) с дополнительными шунтирующими обратными диодами с малым временем восстановления 15ETV60 (VD17,VD18). Пассивную - два последовательно включенных конденсатора, каждый из которых состоит из пяти соединенных в параллель пленочных конденсаторов с малыми потерями типа СВВ81 0,1 мкФ на 1000 В (С8, С9). Пассивная ветвь образует емкостную балластную нагрузку по расщепленной схеме (т.е. переменная составляющая тока в балластной нагрузке расщепляется на две половины, которые затем замыкаются в выходной емкости сетевого фильтра). В диагональ моста включен силовой трансформатор Tr2, вторичная обмотка которого нагружена на двухполупериодный выпрямитель на быстрых диодах 150EВU04 (VD19, VD20). Каждый из выпрямительных диодов VD19 и VD20 защищен от выбросов обратного напряжения снабберной цепочкой из резисторов R7 и R8 и конденсаторов С6, С7 соответственно и саппрессорами 1.5KE350СА (VD21,VD22). В цепь первичной обмотки силового трансформатора включен трансформатор тока Tr1, выход которого используется для формирования сигнала ООС. Выпрямленное напряжение силового инвертора подается на два приборных гнезда – плюс и минус, для подключения сварочных проводов.

Питание силового инвертора осуществляется от сетевого выпрямителя, выполненного по мостовой схеме на 16 диодах FR607 (по 4 в плече, VD1-VD16). Выбор типа выпрямительных диодов не имеет принципиального значения. В конкретном случае применение диодов FR607 объясняется возможностью их использования без радиаторов. Батарея конденсаторов С1 образует токоограничивающую ячейку, включаемую на время начального заряда конденсаторов фильтра сетевого выпрямителя. По достижению готовности к работе ячейка замыкается контактами реле модуля включения. Фильтрация выпрямленного напряжения сети осуществляется электролитическими конденсаторами суммарной емкостью 1500 мкФ (С2) с рабочим напряжением 400 В. Параллельно электролитическим конденсаторам, разделенным на три группы, включены пленочные блокировочные конденсаторы емкостью 1 мкФ в каждой группе (С3). Два блокировочные конденсатора С4,С5 емкостью 1 мкФ установлены непосредственно между коллектором верхнего и эмиттером нижнего ключей для шунтирования по высокой частоте активной ветви полумоста. Обратите внимание на разводку шин питания силового инвертора. Участки между конденсаторами сетевого фильтра, пассивной ветвью полумоста и блокировочными конденсаторами ключей образуют искусственную линию с очень низким волновым сопротивлением (порядка десятой доли Ома), препятствующую распространению по монтажу коммутационных бросков тока, вызывающих появление нежелательных наводок и паразитных связей.

Резисторы связи R3,R5 впаиваются непосредственно между выводами микросхемы IR2110 и затворами ключей. Резисторы R4,R6, включенные между эмиттером и затвором силовых ключей, обеспечивают утечку опасных статических зарядов.

На электрической схеме базы показаны также элементы, связанные с базой лишь конструктивным размещением, но функционально относящиеся к соответствующим модулям. Эти элементы имеют двойную нумерацию. Первое число указывает порядковый номер элемента в группе однотипных элементов конкретного модуля, номер которого обозначается вторым числом. Принята следующая нумерация:

- 1 – модуль управления силовыми ключами,
- 2 – модуль инвертора горячего старта,
- 3 – модуль включения и термоконтроля.

В числе этих элементов:

- R1-1 – переменный резистор уставки тока,
- HL1 -3 – светодиод модуля включения,
- SB1-2 – кнопка с фиксацией модуля инвертора горячего старта,

Тр1-2 – силовой трансформатор модуля инвертора горячего старта,
Тр2-2 – трансформатор тока модуля инвертора горячего старта,
Др1-2 – дополнительная катушка индуктивности (дроссель) в цепи первичной обмотки силового трансформатора модуля инвертора горячего старта,
Др3-2 – дроссель поджига модуля инвертора горячего старта,
Тд1-3, Тд2-3 – термодатчики модуля включения и термоконтроля.

2.1.2 Электрорадиоэлементы базы

Частично параметры примененных электрорадиоэлементов базы были указаны выше. В дополнение к этому ниже приводятся сведения об остальных компонентах базы.

Резисторы:

разрядный резистор R3 электролитов сетевого выпрямителя - 75 кОм, 2 Вт;

R3, R5 – 5,1 Ом, 0,125 – 0,25 Вт;

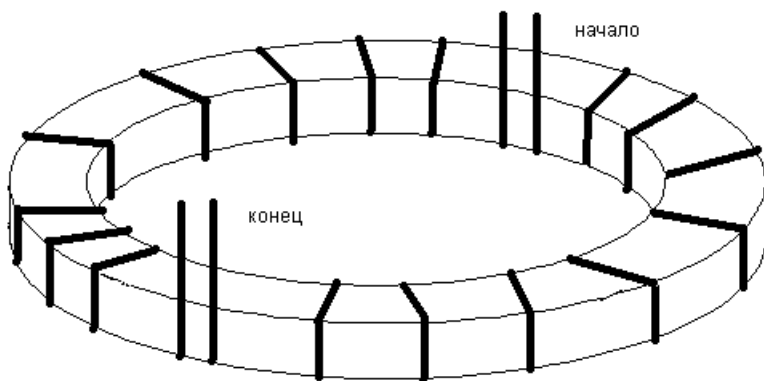
R4, R6 - 1 кОм, 0,125 – 0,25 Вт;

R7, R8 - 20 Ом, 2 Вт.

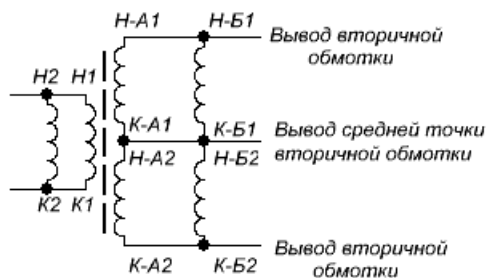
Конденсаторы, особенно электролитические большой емкости на напряжение 400 В, составляют существенную часть стоимости инвертора. Поэтому вопрос выбора применяемых деталей требует осмотрительного подхода. Критериями могут быть стоимость 1 мкФ емкости у электролитов разного типа и разных производителей, а также обеспечение требуемых электрических и эксплуатационных характеристик. На момент закупки деталей для макета наилучшим по состоянию рыночных цен оказался вариант использования в выпрямителе сети электролитов 100 мкФ на 400 В. Для них цена 1 мкФ составляла 0,008 \$, в то время как для электролитов 470 мкФ на 400 В она достигала 0,04-0,05 \$ за 1 мкФ. Кроме того батарея конденсаторов меньшей емкости, баян на жаргоне, нередко обладает лучшими электрическими характеристиками, чем один конденсатор большой емкости. По этим соображениям в макете требуемая емкость сетевого фильтра 1500 мкФ набрана из 15 штук электролитов по 100 мкФ (конденсатор С2 на схеме).

Для синусоидальных токов частотой в несколько десятков кГц электролитические конденсаторы большой емкости имеют полное сопротивление в несколько сотых Ом. Поэтому потери в них и следовательно разогрев даже при токах амплитудой в десятки А в этом случае невелики. В случае несинусоидальных токов богатых высшими гармониками картина существенно меняется и электролиты необходимо шунтировать блокировочными конденсаторами. При пульсациях порядка 20-30 В вполне допустимо использовать металлопленочные конденсаторы с лавсановой изоляцией, сравнительно дешевые, но имеющие не слишком высокие электрические характеристики на частотах работы сварочных инверторов. Из отечественных к ним относятся К73-17, но предпочтительнее ориентироваться на импортные (китайские) аналоги, имеющие лучшие массогабаритные показатели. В макете для этих целей использованы импортные конденсаторы с лавсановой изоляцией емкостью 1 мкФ и рабочим напряжением 400 В (позиции С1, С4. С5). Этот же тип конденсаторов использован и в позиции С1 (токоограничивающий конденсатор). Напротив, в позициях С8, С9 применены конденсаторы с полипропиленовой изоляцией, имеющей достаточно малые диэлектрические потери на высоких частотах. Суммарная емкость каждого из них 0,5 мкФ и набраны они из пяти штук по 0,1 мкФ с рабочим напряжением 1000 В. По соображениям снижения потерь тот же тип конденсаторов (СВВ81) использован в цепи снабберов выходных диодов – позиции С6, С7.

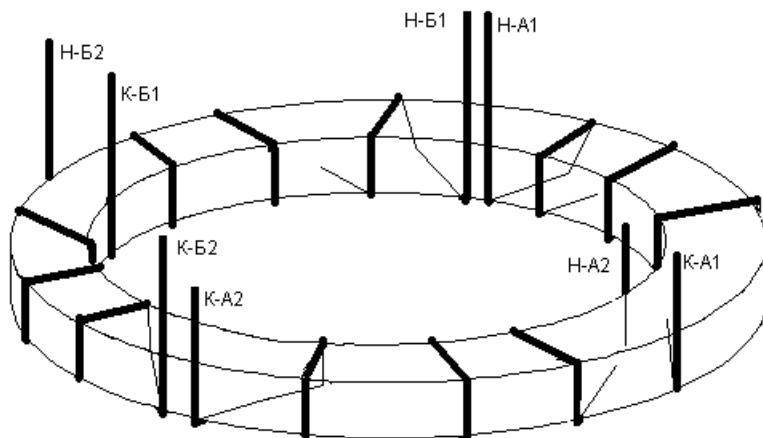
Силовой трансформатор Тр2 выполнен на кольцевом сердечнике Эпкос R63*38*25 из материала N87. Конструкция силового трансформатора поясняется рис. 3. Для снижения индуктивности рассеяния применена встречно-секционированная обмотка. Первичная обмотка выполнена из двух встречно намотанных секций из 12 полных и одного неполного витка в каждой секции. Намотка выполняется жгутом из 7 эмалированных проводов диаметром 0,65- 0,7 мм. Жгут плотно обматывается липкой



а) Схема намотки первичной обмотки



б) Схема электрических соединений выводов секций силового трансформатора



в) Схема намотки вторичных обмоток

Рис.3 Конструкция силового трансформатора

ПВХ лентой в два слоя (шаг намотки в полширины ленты) поверх которой накладывается обмотка из фторопластовой ленты. Концы жгута с наложенной изоляцией бандажируются монтажной ниткой и проклеиваются клеем БФ или аналогичным. Для намотки вторичной обмотки используется двоянные жгуты с тем же количеством проводом. Пара жгутов складывается в виде плоской ленты и обматывается липкой изоляцией в два слоя. Концы обмоточных секций разделяются аналогично первичным. Количество витков одной секции вторичной обмотки для работы в сетях с нормальным напряжением 4, из которых один в зависимости от принятой схемы расположения выводов может оказаться неполным. Для работы в слабых сетях имеет смысл добавить пятый неполный виток. Для удобства распайки выводов целесообразно расположить вторичную обмотку со смещением на 45 град. относительно первичной.

Трансформатор тока Тр1 представляет собой ферритовое кольцо К28*16*9 из материала 2000НМ1 с обмоткой из 40 витков гибкого монтажного провода сечением 0,12-0,14 кв.мм, сквозь отверстие которого пропущен один из выводов первичной обмотки силового трансформатора. Может быть использован провод марок МГШВ, МГВ, МГТФ и др.

2.2 Электрическая схема модуля управления силовыми ключами

Функционирование модуля управления силовыми ключами в общих чертах было описано выше. Рассмотрим более подробно схемотехническое построение модуля применительно к решаемым задачам. Электрическая схема модуля управления силовыми ключами представлена на рис. 4.

Задающий генератор собран на микросхеме TL494. Резистор R6 совместно с подстроечником R7 и конденсатор С5 образуют времязадающее звено, позволяющее изменять рабочую частоту в диапазоне ~42- 55 кГц.

Для оценки величины сварочного тока напряжение на вторичной обмотке трансформатора тока базы Тр1 детектируется с помощью выпрямительного мостика на диодах 1N5819 (VD1-VD4). Вторичная обмотка Тр1 нагружена на низкоомное сопротивление, состоящее из двух включенных в параллель резисторов R2,R3 по 10 Ом каждое. Низкоомная нагрузка этой цепи необходима для исключения насыщения сердечника трансформатора тока при экстремальных значениях тока в сварочной цепи. Огибающая продектированного напряжения выделяется на RC нагрузке, состоящей из потенциометра R8, с помощью которого выставляется необходимый уровень выходного сигнала, и конденсатора С7. Быстрые изменения уровня сигнала сглаживаются интегрирующей цепочкой R9C8 с постоянной времени 1 мсек. Сглаженное напряжение с конденсатора С8 при установке джампера (перемычки) J1 в положение “работа” поступает на неинвертирующий вход встроенного операционного усилителя микросхемы TL494 (вывод 1). Использование J1 в положении “настройка” рассмотрено ниже в разделе, посвященном описанию регулировке и настройке аппарата.

На второй инвертирующий вход операционного усилителя подается напряжение уставки тока, которое задается делителем из резисторов R1 и R1-1. Выход делителя напряжения шунтирован блокировочным конденсатором С1. Для приблизительного выравнивания выходных сопротивлений источников сигналов, поступающих на входы операционного усилителя, и уменьшения изменения этого параметра по каналу уставки тока напряжение делителя R1,R1-1 поступает на инвертирующий вход операционного усилителя микросхемы TL494 (вывод 2) через резистор R4.

Во входном каскаде операционного усилителя сигналы, поступившие на его входы, сравниваются между собой и разность их усиливается. Коэффициент усиления встроенного операционника TL494 в среднем составляет 95 дБ, что явно избыточно в нашем случае. Величина коэффициента усиления снижается с помощью отрицательной

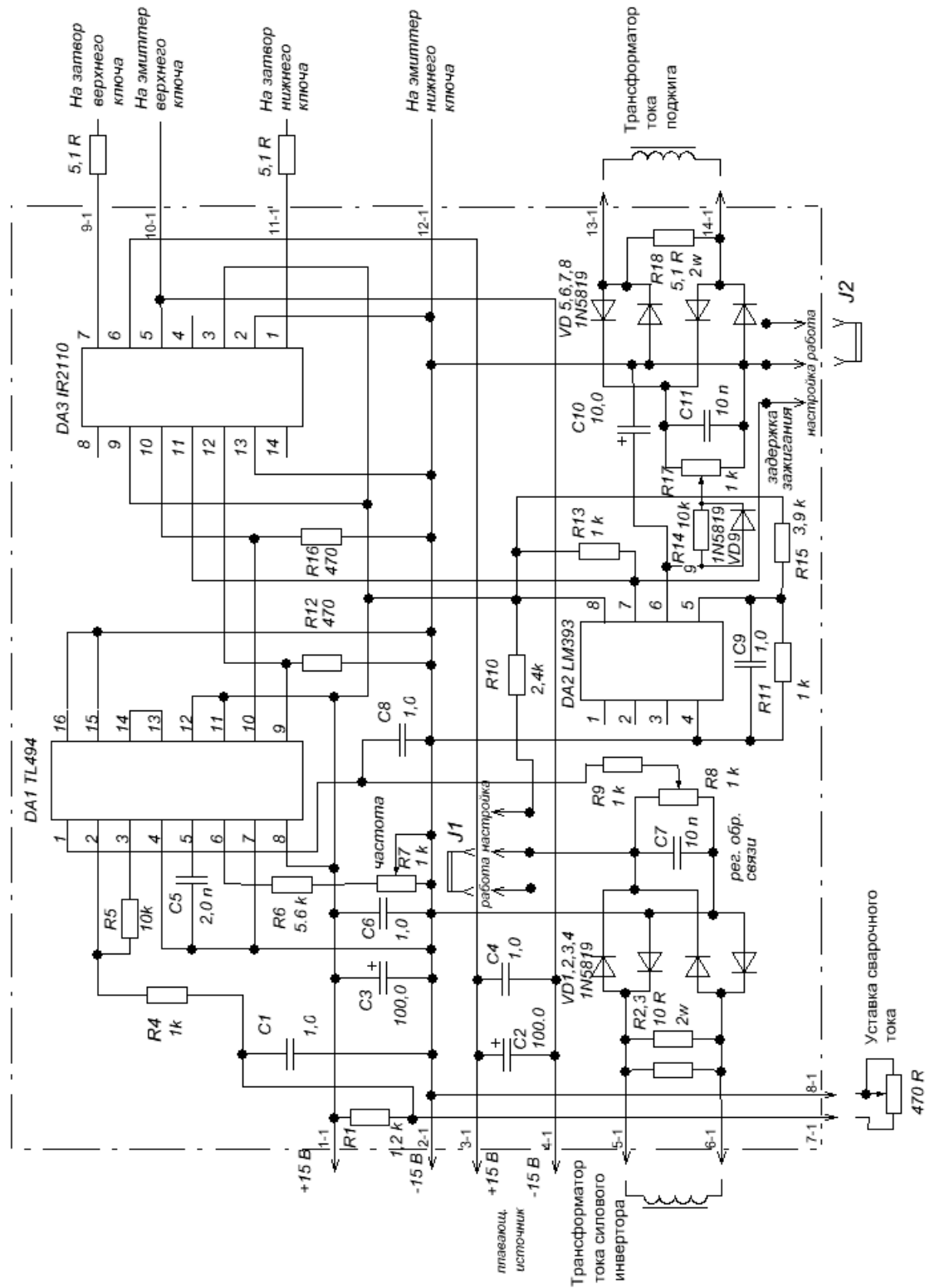


Рис. 4 Электрическая схема модуля управления ключами

обратной связи, для чего выход усилителя (вывод 3) связывается с инвертирующим входом через резистор R5. При выбранном значении R5 коэффициент усиления операционника составляет около 10.

Выходной сигнал операционного усилителя регулирует длительность выходных импульсов TL494, причем увеличение уровня сигнала приводит к уменьшению длительности. Такая динамика регулирования объясняет свойство модуля управления выдавать максимальную длительность импульсов на холостом ходу инвертора. В микросхеме TL494 два операционных усилителя. В модуле управления задействован только один. Входы второго (выводы 15,16) для исключения его влияния соединены с общим проводом (условной “землей”). Возможен также альтернативный вариант ‘глушения’ второго усилителя. Для этого на вывод 15 подается напряжение с вывода 14 от внутреннего источника опорного напряжения микросхемы, а вывод 16 по-прежнему соединен с “землей”.

Управление длительностью бестоковой паузы между импульсами (deadtime) в данной схеме не требуется благодаря коротким фронтам управляющих импульсов, формируемых микросхемой IR2110, и особенностям формы импульсов тока силовых ключей. По этой причине вывод 4 микросхемы TL494 соединен с общим проводом, что дает минимальную длительность паузы и соответственно возможность получения предельной длительности рабочего импульса.

Выход микросхемы TL494 скоммутирован для работы в двухтактном режиме, для чего выводы 13 и 14 соединены между собой. Выходные сигналы снимаются с резисторов R12, R16, соединенных с 9 и 10 выводами TL494, и подаются на входы полумостового драйвера IR2110 (выводы 10 и 12). Микросхема IR2110 имеет высокую электрическую прочность по драйверу верхнего ключа, что позволяет обойтись без применения специальных мер обеспечения гальванической развязки. Питание +15 В относительно общего провода (“земли”) подается на 3 и 9 выводы. 2 и 13 выводы IR2110, соответствующие минусовым полюсам цепей питания выходного усилителя нижнего ключа и входной логики соединяются с общим проводом. Питание выходного усилителя верхнего ключа осуществляется от отдельного “плавающего” источника, не имеющего гальванической связи с общим проводом. Плюсовой полюс этого источника подается на 6 вывод, минусовой – на 5 вывод. С выводов 1 и 7 через резисторы связи величиной 5,1 Ом импульсы управления поступают на затворы соответственно нижнего и верхнего ключей. Отметим здесь один **исключительно важный** аспект. Между точкой соединения выводов 2,13 микросхемы IR2110 с общим проводом (условно говоря местным “заземлением”) и ее выводом 1 заканчивается тракт формирования управляющего сигнала для нижнего ключа. И **только из этой точки** допустимо проложить короткий проводник, **единственно** соединяющий ее с минусом силового выпрямителя непосредственно на выводе эмиттера нижнего ключа. Аналогичным образом должна выполняться подводка управляющего импульса на верхний ключ. Т.е. короткий проводник непосредственно между выводом 5 и эмиттером верхнего ключа. Несоблюдение этого правила ради сомнительных удобств выполнения электрических соединений чаще всего приводит к появлению нежелательных наводок, самовозбуждению и громкому БАХу силовых ключей. И тут уже не помогут никакие экраны, развитые заземляющие полигоны печатных плат и прочая лабуда.

Вывод 11 микросхемы IR2110 (shutdown) используется для управления запуском силового инвертора после обнаружения тока в цепи горячего старта. Управляющий сигнал поступает с выхода компаратора на микросхеме LM393 (вывод 7). Его формирование происходит следующим образом. На неинвертирующий вход компаратора (вывод 5) поступает опорное напряжение около 3 В с делителя R15,R11. Выход делителя напряжения шунтирован по высокой частоте конденсатором C9. На инвертирующий вход подается протектированное напряжение с выхода вторичной обмотки трансформатора тока модуля горячего старта, нагруженной на низкоомный резистор R18/ Детектирование

осуществляется с помощью мостика диодов VD5-VD9 типа 1N5819. Нагрузкой детектора служит потенциометр R17 и блокирующий конденсатор C11. С движка потенциометра сигнал поступает на интегрирующую цепь R14C10 и далее на инвертирующий вход LM393 (вывод 6). С момента зажигания дуги горячего старта напряжение на конденсаторе C10 начинает нарастать по экспоненциальному закону. В крайнем верхнем положении движка R17 оно может достигать 10- 12 В. Потенциометром R17 это значение можно понизить так, чтобы задержка момента зажигания силовой дуги составляла желаемое значение. Параллельно резистору R14 включен обратный диод VD9, ускоряющий разряд накопительного конденсатора C10. Для обеспечения процесса настройки в схему введена возможность имитации наличия тока в цепи горячего старта с помощью переключения джампера J2. Использование J2 для настройки рассмотрено ниже.

Фильтрация питающих напряжений от возможных помех и наводок по каждому из двух источников парой из двух конденсаторов: электролитическим C2, C3 и керамическим C4, C6 соответственно.

Номиналы электрорадиоэлементов указаны на схеме. Мощности, рассеиваемые на резисторах, в большинстве случаев не превышают 0,1- 0,2 Вт. Поэтому в макете применены резисторы с мощностью рассеяния 0,25 Вт за исключением нагрузочных сопротивлений трансформаторов тока. Рекомендуемые значения мощности резисторов 2 Вт. Рабочее напряжение электролитических конденсаторов, примененных в схеме 25 В. Прочие конденсаторы – керамические с рабочим напряжением 50- 60 В.

2.2 Электрическая схема модуля инвертора горячего старта

2.3.1 Описание электрической схемы модуля

Электрическая схема модуля инвертора горячего старта приведена на рис. 5. Инвертор выполнен по полумостовой схеме с конденсаторным балластом во многом аналогичной основному силовому тракту.

Для электропитания инвертора используются два источника:

- напряжением около 300 В от сетевого выпрямителя силового тракта и
- напряжением +15 В относительно минуса сетевого выпрямителя.

Поступающие напряжения питания фильтруются по входу парой конденсаторов. Для 300В - электролитическим емкостью 100 мкФ с рабочим напряжением 350- 400 В и металлопленочным (с лавсановой изоляцией) емкостью 1 мкФ на 400 В. Для +15 В используется электролит 100 мкФ на 25 В и керамический 1 мкФ на 50-60 В.

Ключи в активной ветви полумоста VT2, VT3 – IGBT типа IRG4BC30U. Выбор этого типа ПП приборов обусловлен весьма малыми тепловыми потерями в них, что позволяет обойтись простейшими пластинчатыми радиаторами от компьютерных блоков питания АТ или АТХ. Ключи шунтированы обратными (антипараллельными) диодами VD2, VD3 типа SF56. Пассивная ветвь полумоста выполнена по схеме с расщепленным балластным конденсатором C8, C9. Изменяя величину емкости C8, C9, можно изменять ток дуги горячего старта. С увеличением их ток возрастает.

Для раскачки транзисторных ключей IRG4BC30U используется активный полумостовой драйвер IR2153. Резистор R3 и конденсатор C6 образуют времязадающую цепочку, обеспечивающую рабочую частоту около 50 кГц. С помощью полевого транзистора BS170 производится управление работой задающего генератора пилообразного напряжения. При нулевом потенциале базы канал транзистора закрыт, генератор пилы самовозбуждается и на выходе микросхемы (выводы 5, 7) присутствуют управляющие импульсы для ключей. Это состояние соответствует режиму “работа” и возникает при нажатой кнопки SB1-2. При отжатии кнопки на затвор транзистора VT1 поступает высокий потенциал от делителя напряжения R1, R2. Канал транзистора VT1 полностью открывается и закорачивает времязадающий конденсатор C6. Генерация при этом срывается, импульсы на выходе отсутствуют. Данное состояние соответствует режиму “ожидание”. Для защиты

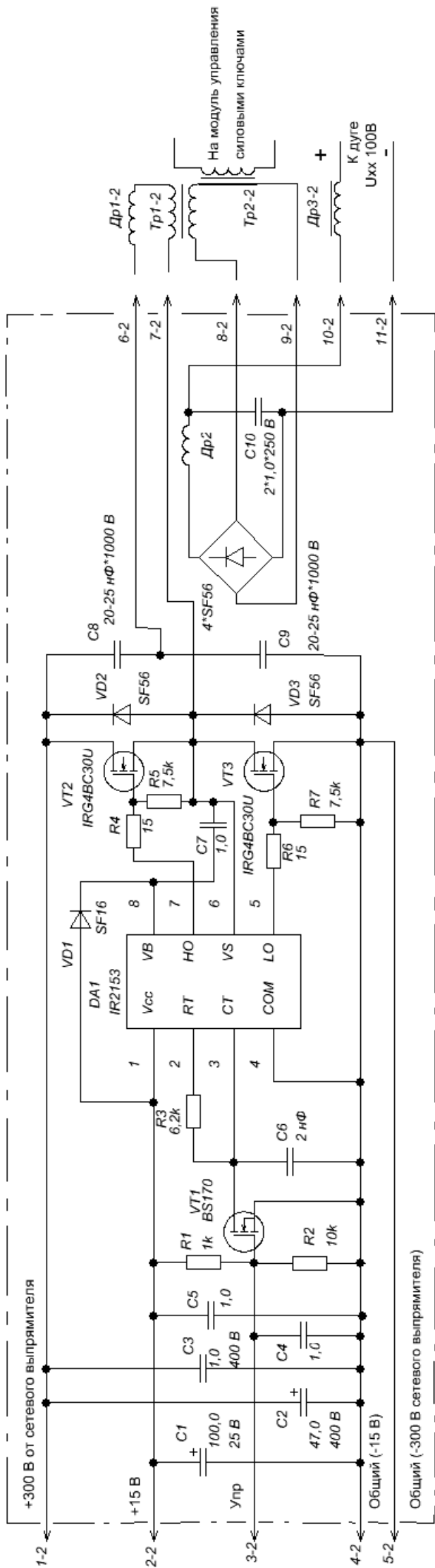


Рис 5 Электрическая схема модуля инвертора горячего старта

от возможных помех выход делителя R1, R2 зашунтирован блокировочным конденсатором C4. Выходные импульсы микросхемы IR2153 через резисторы связи R4, R6 на затворы ключей. Между затворами и эмиттерами IGBT включены резисторы утечки R5, R7.

В схеме инвертора применено бутстрепное питание драйвера верхнего ключа. Работа его происходит следующим образом. При открывании нижнего ключа происходит заряд конденсатора C7 через диод VD1 и открытый транзистор. На конденсаторе за время длительности открывающего импульса устанавливается напряжение заряда лишь немногим меньшее, чем напряжение питания +15 В. В следующем такте конденсатор C7 начинает отдавать заряд на питание выходного усилителя драйвера верхнего ключа через 8 (плюс) и 6 (минус) выводы микросхемы IR2153. Благодаря тому, что вывод 6 электрически связан с эмиттером верхнего ключа, выходной импульс драйвера с вывода 7 через резистор R4 поступает на затвор верхнего ключа и открывает его. Далее процесс повторяется.

Со средней точки активного плеча напряжение поступает на первичную обмотку трансформатора Tr1-2 и далее через дроссель Др1-2 передается на среднюю точку пассивной ветви полумоста. Дроссель Др1-2 вносит дополнительную индуктивность в эту ветвь схемы и понижает частоту ее собственного резонанса при КЗ в нагрузке для снижения вредного действия эффекта дробления импульса. Пассивная ветвь полумоста, состоящая из конденсаторов C8 и C9, в первом приближении действует как достаточно большое реактивное сопротивление, включенное последовательно с нагрузкой. Благодаря этому инвертор приобретает падающую внешнюю характеристику и имеет естественное ограничение по величине тока КЗ. Конденсаторы C8 и C9 металлопленочные с полипропиленовой изоляцией. Рабочее напряжение конденсаторов 1000 В. Выбор конденсаторов с высоким рабочим напряжением, в несколько раз превышающем реально действующие значения, объясняется достаточно высокой нагрузкой их по току.

Вторичная обмотка Tr1-2 через трансформатор тока Tr2-2 нагружена на выпрямитель по мостовой схеме из 4-х диодов SF56, напряжение с которого через сглаживающий фильтр Др2, C10 поступает на дроссель поджига Др3-2. Конденсатор C10 металлопленочный с лавсановой изоляцией на рабочее напряжение 250 В. При касании электродом свариваемой детали через этот дроссель протекает ток КЗ цепи горячего старта. Дроссель Др3-2 накапливает некоторую энергию, которая при отрыве электрода освобождается в виде свободных колебаний в сварочной цепи с амплитудой в несколько сотен В.

2.3.2 Электрорадиоэлементы модуля инвертора горячего старта

Все резисторы, примененные в макете модуля инвертора горячего старта имеют мощность рассеяния 0,25 Вт. Номиналы деталей указаны на схеме. Неотмеченные по тексту конденсаторы - керамические с рабочим напряжением 50- 60 В.

В состав модуля входят несколько точечных изделий.

Для трансформатора Tr1-2 может быть применен кольцевой сердечник Эпкос R38 из материала N87 или 2 кольца K28*16*9 из материала 2000НМ1. Первичная обмотка из 27 витков проводом ПЭТВ или аналогичным в эмалевой изоляции. Вторичная обмотка содержит 18 витков любого гибкого монтажного провода сечением 0,75 кв.мм.

Трансформатор тока Tr2-2 на кольце K20*10*5 из материала 2000НМ1 имеет только вторичную обмотку из 10 витков гибкого монтажного провода сечением 0,12- 0,14 кв.мм. Первичной обмоткой служит вывод трансформатора Tr1-2, продетый сквозь отверстие сердечника.

Дроссель Др1-2 (фактически катушка индуктивности) намотан на обломке ферритовой антенны диаметром 10 мм длиной около 45 мм. Обмотка содержит около 30 витков

монтажного провода сечением 0,5 кв.мм, уложенных в два слоя. Примерная индуктивность дросселя около 30 мкГн. При размещении дросселя следует обратить внимание на то, что вблизи его существует довольно сильное поле индукционного нагрева. Поэтому желательно отдалить дроссель от металлических частей аппарата не менее, чем на 10 мм. В дальнейшем планируется отработать конструкцию этого узла для устранения данного недостатка.

Дроссель фильтра Др2 не имеет ферромагнитного сердечника. Представляет собой небольшую бескаркасную катушку, намотанную виток к витку на оправке диаметром 10 мм.

Дроссель поджига Др3-2 намотан на половинке сердечника ПК. Намотка ведется гибким монтажным проводом сечением 0,75 кв.мм в два слоя от “рога” до “рога”.

2.2 Электрическая схема модуля включения и термоконтроля

Электрическая схема модуля включения и термоконтроля приведена на рис. 5. Контролируемое напряжение на электролитических конденсаторах выпрямителя сети через гасящий резистор R1 поступает на входной светодиод оптрона РС817. Указанное на схеме значение сопротивление R1 из-за разброса вольт-амперных характеристик диодов является ориентировочным и подлежит уточнению при настройке аппарата. Фототранзистор оптрона РС817 включен по схеме эмиттерного повторителя. Сигнал нагрузки R2 поступает на неинвертирующий вход (вывод 3) компаратора LM393. На инвертирующий вход (вывод 2) подается опорное напряжение от регулируемого делителя R3-R4-R5. Если сигнал оптрона превышает, опорное напряжение компаратор приходит в закрытое состояние. Напряжение на его выходе (вывод 1) повышается и открывает полевой транзистор BS170. Если термодатчики находятся в замкнутом состоянии (перегрева нет), происходит срабатывание реле K1, включенного в цепь стока BS170. Контакты реле замыкают токоограничивающий конденсатор на входе сетевого выпрямителя. Происходит быстрый дозаряд конденсаторов фильтра без опасных бросков тока и аппарат готов к работе, о чем свидетельствует загорание светодиода на лицевой панели.

Катушка реле шунтирована демпфирующим диодом SF16, защищающим от выбросов обратного напряжения при выключении реле транзистор BS170 и светодиод. В модуле применено реле с током размыкания контактов до 16 А. Рабочее напряжение реле 12 В. Сопротивление обмотки 150 Ом. Для приведения питающего напряжения в соответствие с номинальным последовательно с катушкой реле включен гасящий резистор R7 номиналом 30 Ом и мощностью рассеяния 0,5 Вт. Остальные резисторы модуля имеют мощность рассеяния 0,25 Вт.

При понижении напряжения сети ниже заданного значения происходит размыкание контактов реле и аппарат переходит в безопасный режим. Перегрев радиаторов силовых ключей и диодов вызывает размыкание контактов термодатчиков. Цепь истока транзистора BS170 при этом оказывается разомкнутой, что приводит к отпуску контактов реле. Случайные замыкания в цепи питания силового инвертора дают резкое падение напряжения на конденсаторах фильтра, что также вызывает размыкание контактов реле. По этой причине в схеме инвертора отсутствует предохранитель. Его функции выполняет модуль включения. Время срабатывания реле в аварийной ситуации около 10 мсек, что сравнимо с быстродействием выключателей-автоматов.

3. Настройка сварочного инвертора

Настройка инвертора, естественно, начинается с проверки правильности монтажа без подачи питающих напряжений. После того, как найденные ошибки устранены, начинается поэтапная проверка аппарата в целом.

Для начала необходимо отключить подачу сетевого напряжения на силовой

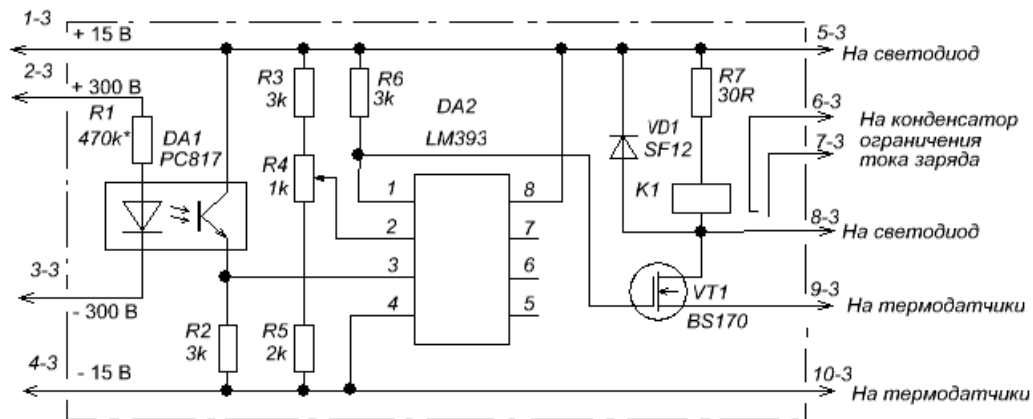


Рис. 6 Модуль включения и термоконтроля

выпрямительный мост. Далее включаем аппарат и проверяем работу блока питания слаботочных цепей. При исправном блоке питания сразу приходят во вращение оба вентилятора. Проверяем на холостом ходу величину напряжения на двух выходах блока питания. В норме должно быть 15 В с допустимым отклонением в пределах 0,5 В. Желательно проверить нагрузочную способность блока питания. Даем кратковременную нагрузку на резистор ~10 Ом и измеряем напряжение. Снижение напряжения под нагрузкой не должно превышать двух – трех десятых долей вольта.

Начинаем настраивать модуль включения. Для этого отпаиваем провода, идущие к электролитам сетевого фильтра. Для настройки понадобится временный делитель напряжения с плавно изменяемым выходным напряжением (“сопля” или “живопырка”, кто как это дело называет). Его можно соорудить из переменного сопротивления СП-2 величиной 20-25 кОм и двухваттного резистора на 47-51 кОм. Подключаем делитель к выпрямителю блока питания слаботочных цепей и убеждаемся, что он дает на движке потенциометра изменяющееся напряжение от 200 В до 300 В или несколько шире в зависимости от номиналов примененных деталей и напряжения сети. Подсоединяем делитель с соблюдением полярности к контактам 2-3 и 3-3 модуля включения. На контакты 1-3 и 4-3 подаем питающее напряжение +15 В с того из двух выходов блока питания, минус которого будет соединяться с минусом силового выпрямителя. Устанавливаем на делителе максимальное напряжение (примерно 300 В). Измеряем напряжение на выводе 3 микросхемы LM393. Оно должно составлять 6-7 В. При необходимости изменяем величину резистора R1, чтобы получить это значение.

На этом предварительная настройка модуля включения закончена. Регулировочные цепи введены в линейный режим, можно приступить к завершающему этапу – выставлению напряжения срабатывания. Ставим движок потенциометра делителя в положение минимального выходного напряжения, а движок подстроечника R4 в положение максимума опорного напряжения. Повышаем напряжение на выходе делителя до 240-250 В. Это значение будет соответствовать минимально допустимому напряжению на выходе выпрямителя под нагрузкой. Далее плавно снижаем подстроечником напряжение опоры до щелчка контактов сработавшего реле. Меняя в небольших пределах положение движка делителя по вольтметру определяем напряжение срабатывания и отпускания реле. Если оно находится в пределах 240-250 В, настройку модуля можно считать законченной. Если Вы наблюдаете какие-то несоответствия, остановитесь там, где Вы считаете правильным.

Теперь проверяем мягкость включения аппарата. Подключаем штатно модуль включения к электролитам. Временный делитель удаляем. Отключаем от силового выпрямителя модуль инвертора горячего старта и силовые ключи. Электролиты подключаем к выпрямительному мосту. Включаем сеть. Примерно через секунду должен засветиться светодиод “Готов” и негромко щелкнуть реле. Никакого мигания осветительных приборов при этом не должно наблюдаться. Проверяем напряжение на электролитах силового выпрямителя. Результат должен быть 300-310 В для нормальной сети 220 В.

Следующим этапом является настройка модуля инвертора горячего старта. Проверяем отсутствие подключения контакта 1-2 к силовому выпрямителю. Включаем сеть 220 В. Проверяем наличие питающего напряжения + 15 В на контакте 2-2. Отключив аппарат, устанавливаем временную перемычку между контактами 1-2 и 2-2 (запитываем модуль напряжением 15 В по всем цепям). Снова включаем сеть, переводим кнопку SB1 в положение “работа” и проверяем осциллографом форму сигнала на выводе 3 микросхемы IR2153. Должны наблюдаться пилообразные колебания с периодом около 10 мксек. Проверяем форму сигналов на затворах ключей IRG4BC30U. Должны наблюдаться прямоугольные импульсы с короткими фронтами длительностью около 10 мксек. Импульс верхнего ключа имеет положительную подставку, формируемую бутстрепным питанием.

Проверяем форму сигнала на выводах вторичной обмотки. Она должна иметь форму, напоминающую меандр. Задний фронт может иметь скос или завал. Размах сигнала от верха до низа около 10 В. Проверяем постоянное напряжение на выходе модуля. Если выводы модуля (контакты 10-2 и 11-2) уже подсоединены к выходным клеммам аппарата, то измерение производим непосредственно на клеммах. В норме напряжение должно составлять 4-5 В. Проверяем действие кнопки “работа – ожидание”. При отжатии кнопки напряжение на выходе должно пропадать, при нажатии появляться. Если результаты проверок оказались положительными, переходим к завершающему этапу настройки модуля горячего старта.

При отключенном от сети аппарате отпаиваем перемычку между контактами 1-2 и 2-2. Контакты 1-2 и 5-2 с соблюдением полярности подключаем к электролитам сетевого выпрямителя. Кнопку ставим в положение “ожидание”. Подаем 220 В. По зажигании светодиода “Готов” переводим кнопку в положение работа. Измеряем напряжение на выходных клеммах аппарата. В норме должно быть 100-105 В. Пробуем зажечь дугу горячего старта. К минусовой клемме подключаем любую массивную железку. К плюсовой - электрод или гвоздь толщиной 2-3 мм. Чиркаем по железке, должно загореться небольшая дуга. Наблюдать дугу можно без маски в обычных солнцезащитных очках. Измеряем ток дуги. Хорошее зажигание и устойчивое горение получается при токе дуги 3-5 А. Измеряем ток КЗ. Если он не превышает 15 А, можно завершить настройку модуля инвертора горячего старта. Если выше имеет смысл уменьшить величину конденсаторов С8, С9 и вновь проверить качество дуги поджига.

Настройка модуля управления силовыми ключами начинается с проверки наличия напряжения питания по двум источникам 15 В. Далее проверяется функционирование микросхемы TL494. Подключая осциллограф к выводам 9 и 10, наблюдаем прямоугольные импульсы с коэффициентом заполнения примерно 0,42-0,45, длительность которых не изменяется при изменении положения потенциометра “Уставка тока”. Оставляем этот потенциометр в среднем положении. Переводим джампер J1 в положение “настройка”. При этом, благодаря подключению нагрузки детектора тока дуги силового инвертора через резистор R10 (схема рис.3) к +15 В, на ней появляется напряжение, имитирующее сигнал при реальном токе в цепи дуги. Перемещая движок подстроечника R8, убеждаемся в том, что при изменении напряжения на выходе детектора происходит изменение длительности импульсов TL494. Оставляем движок R8 в положении 0,8-0,9 от максимума. Подстроечником R7 устанавливаем частоту следования импульсов в пределах 42-45 кГц, т.е. период равен примерно 22-23 мксек.

Проверяем прохождение импульсов управления через драйвер IR2110. Смотрим наличие импульсов на входе (выводы 10 и 12). Переводим джампер J2 в положение “настройка”. Это задает нулевой разрешающий потенциал на вход SD микросхемы IR2110. Смотрим наличие импульсов управления на выходе драйвера непосредственно между эмиттером и затвором силовых ключей. Должны наблюдаться прямоугольные импульсы в короткими фронтами амплитудой около 15 В.

Теперь проверяем отработку разрешения на запуск силового инвертора. Джампер J2 переводим в положение “работа”. Устанавливаем кнопку SB1 в положение “работа”. Потенциометр R17 “Задержка зажигания” ставим в среднее положение. Далее, касаясь электродом железки, на которой проверялась работоспособность горячего старта, убеждаемся в том, что при зажигании дуги или КЗ через короткий промежуток времени на затворах силовых ключей появляются управляющие импульсы. Окончательная доводка положения потенциометра R17, как и R8 производится в процессе эксплуатации аппарата по удобству и качеству зажигания дуги и качеству сварных соединений.

Финишным этапом настройки является сквозная проверка силового тракта. Переводим джампер J1 в положение “работа”, джампер J2 в положение “настройка”, кнопка SB1

произошло. Стал лишь слегка теплым силовой трансформатор. Осторожный может мелкими шагами также подойти к такому же результату.

Теперь пора ловить кайф. Ставим все джамперы в положение “работа”. Грузим аппарат через штатные сварочные концы на 0,2 Ом, не забыв включить амперметр. Уставку тока на минимум. Включаем сеть при отжатой кнопке SB1 и, как только загорится “Готов”, жмем на кнопку. Начинаем крутить уставку тока. Легко проходим 100 А. Далее без надрыва 120 А. Амперметр должен упереться где-то в 140 ампер. А больше можно? Можно. Крутим подстречник R7 в модуле управления для повышения частоты. Или второй путь – аккуратно впаиваем еще по 0,1 мкФ в каждую ветвь расщепленного конденсатора силового инвертора. Можно то и другое сразу. Но всему есть предел. Непотребства остановит неумолимый страж порядка модуль включения. Либо перегреются радиаторы, либо просядет напряжение на электролитах. И вообще, разгон инвертора по току предмет особого разговора. Теперь пробуем варить.

Оно варит!!! Чисто и без брызг. Только иногда подсвистывает дуга в момент зажигания. Это дают о себе знать биения токов двух инверторов, работающих на разных частотах.

4. Пара слов о конструкции макета сварочного инвертора

Макет собран в двух сболченных корпусах от компьютерных блоков питания. Для силовых диодов применены литые ребристые радиаторы размером 50*45*18 мм. Все остальные радиаторы пластинчатые, как и вентиляторы от тех же неисправных АТХ. Вес инвертора 2,5 кг.

* * *

Что-то вроде лицензионного соглашения

Этот материал находится в свободном доступе и может использоваться каждым в любых целях, включая откровенный плагиат, со ссылкой на первоисточник или без оной.

Все права не защищены.

Отзывы и вопросы направляйте автору по вышеуказанному мылу.

qaki,
Free zone of UCF
06. 14. 2010 y.