

# Сварочный инвертор – резонансный мост с частотным регулированием на МК

Руслан Липин, г. Хабаровск

*Устройство, описание которого представлено в настоящей статье, предназначено для электродуговой сварки штучными электродами. Аппарат дуговой сварки должен обеспечивать падающую вольтамперную характеристику в нагрузке (дуге). В мостовых инверторах, как правило, падающая характеристика обеспечивается достаточно сложной электроникой с обязательной обратной связью по току. С точки зрения простоты управления, на мой взгляд, наиболее привлекателен именно резонансный мост. В нем падающая характеристика источника сварочного тока обеспечивается параметрическими свойствами резонансной цепи в первичной цепи инвертора.*

В промышленных и в большинстве любительских сварочных инверторах наиболее распространен выходной каскад, который называют «косой мост».

Особенностью инвертора, который представлен в этой статье, является не только использование полного резонансного моста, но и управление им с помощью микроконтроллера PIC16F628-20I/P.

Сразу заметим, что максимальный сварочный ток инвертора зависит от настройки. Его значение целиком определяется шириной немагнитного зазора в магнитопроводе резонансного дросселя. Для используемых в инверторе силовых элементов, при условии соблюдения их тепловых режимов, сварочный ток может достигать 200 А.

Принципиальная схема инвертора разделена на две части. На **рис. 1** показана силовая часть, а на **рис. 2** – схема блока питания с блоком управления. Классический мостовой сварочный инвертор состоит из выпрямителя сетевого напряжения с фильтрующими конденсаторами. Постоянное напряжение 300 В с помощью 4 ключей преобразуется в переменное более высокой частоты, которое с помощью сварочного трансформатора понижается, а затем выпрямляется.

В резонансных преобразователях последовательно с первичной обмоткой сварочного трансформатора Т1 включены резонансный дроссель L1 и резонансный конденсатор С1–С10. Индуктивность последовательного контура состоит из индуктивности резонансного дросселя L1 и индуктивности первичной обмотки трансформатора Т1. Вторичная обмотка Т1 нагружена сварочной дугой. Если емкость С1–С10 и индуктивность L1 величены постоянные, то индуктивность первичной обмотки Т1 зависит от сопротивления нагрузки во вторичной обмотке, т.е. от сварочного тока. Мак-



симальной индуктивности первичной обмотки Т1 соответствует режим «холостого хода» инвертора, а минимальной – режим короткого замыкания. Сопротивление нагрузки определяет также добротность контура. Таким образом, резонансная частота контура минимальна в режиме «холостого хода» (при максимальной индуктивности первичной обмотки Т1) и максимальна в режиме короткого замыкания (при минимальной индуктивности первичной обмотки Т1). Когда нагрузкой инвертора служит сварочная дуга, резонансная частота контура зависит от тока в дуге.

Из всего сказанного выше, очевидно, что частота инвертора при работе на максимальную мощность в дуге должна быть ниже собственной частоты резонансного контура инвертора в режиме короткого замыкания и выше ее в режиме «холостого хода». Оптимально, чтобы резонанс наступал на собственной частоте контура, при которой в дуге развивается максимальная мощность ( $f_{\text{МАКС. МОЩНОСТИ}}$ ). Именно это является основным критерием правильной настройки инвертора. Если в этом случае увеличивать частоту инвертора относительно  $f_{\text{МАКС. МОЩНОСТИ}}$ , то ток в дуге уменьшается за счет увеличения индуктивного сопротивления резонансного дросселя L1. Так осуществляется частотное регулирование тока в сварочной дуге.

Резонанс в контуре инвертора при коротком замыкании и неправильной настройке инвертора возможен и на частоте выше, чем  $f_{\text{МАКС. МОЩНОСТИ}}$ .

Заметим также, что резонанс недопустим в режиме короткого замыкания для транзисторных ключей инвертора по причине возникновения сверхтока в первичной цепи. Поскольку режим короткого замыкания является штатным режимом для сварочного аппарата, необходимо не допускать работу инвертора на частотах выше  $f_{\text{МАКС. МОЩНОСТИ}}$  при коротком замыкании в сварочной цепи.

Для этого в данном инверторе микроконтроллером непрерывно отслеживается факт короткого замыкания сварочных проводов с помощью специального детектора. При возникновении короткого замыкания микроконтроллер автоматически уменьшает частоту инвертора до ранее выставленного значения  $f_{\text{МАКС. МОЩНОСТИ}}$ . На этой частоте резонанс в коротком замыкании невозможен, что предотвращает протекание чрезмерного тока в первичной цепи и, соответственно, через ключи.

В силовой части (рис. 1) R13 – пусковой резистор. Он ограничивает зарядный ток электролитических конденсаторов C16, C17 при включении аппарата. Диодный мост VD14–VD21 предназначен для выпрямления сетевого напряжения 220 В, кото-

рое сглаживается конденсаторами C15–C17 и подается на выходной мост схемы, состоящий из 4 ключей на IGBT-транзисторах VT1–VT4. Супрессоры (трансилы) VD3, VD9 и VD22 защищают ключи от выбросов напряжения. Резисторы R5, R6 разряжают резонансный конденсатор при выключении инвертора. Стабилитроны VD1, VD2, VD4, VD5 не допускают превышения напряжения на затворах ключей выше 18 В. Резисторы R1, R3, R7 и R9 ограничивают выходной ток драйверов в моменты заряда-разряда затворных емкостей ключей. Резисторы R2, R4, R8, R10 обеспечивают надежное закрытие ключей в моменты, когда отсутствует питание драйверов.

Сварочный трансформатор T1 с коэффициентом трансформации 6 понижает напряжение и

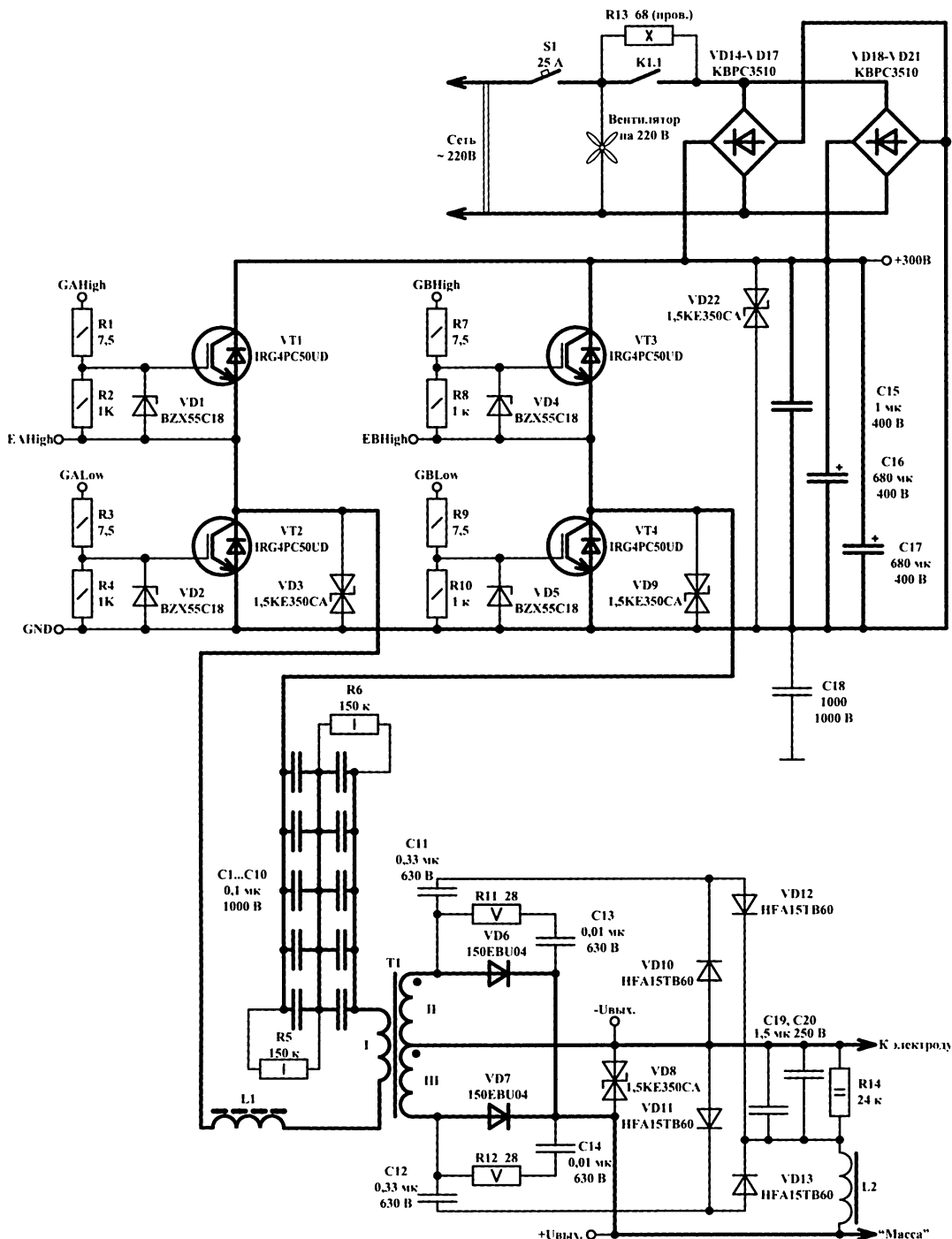


Рис. 1



напряжении на сварочных проводах ниже 9 В (короткое замыкание) на входе RB4 контроллера DD1 появляется высокий логический уровень, а при напряжении более 9 В (короткого замыкания нет) на входе RB4 – низкий логический уровень.

В позиции DD1 использован широко распространенный микроконтроллер (МК) PIC16F628-20I/P в DIP-корпусе. Назначение основных выводов этого МК приведено в **таблице**.

### Работа инвертора

Как только запустится блок питания, начинает работать программа микроконтроллера. Спустя задержку примерно 5 с включится зуммер и начнет работать инвертор. Как только напряжение в сварочных проводах превысит 9 В, МК откроет ключ VT5, который включит реле K1, а контакты реле зашунтирует зарядный резистор R13. Зуммер также отключится. С этого момента инвертор готов к работе. Частота работы инвертора будет определяться положением потенциометра R18. Причем минимальной частоте (она же  $f_{\text{МАКС. МОЩНОСТИ}}$ ) соответствует максимальный сварочный ток, максимальной частоте – минимальный ток. Частота изменяется ступенчато (дискретно). Используется всего 17 позиций. При вращении потенциометра изменение частоты сопровождается коротким звуковым сигналом зуммера. Таким образом, можно по звуку изменить частоту сварочного тока на нужное число позиций.

При коротком замыкании в сварочных проводах инвертор автоматически начинает работать на частоте  $f_{\text{МАКС. МОЩНОСТИ}}$ . Работа инвертора в режиме короткого замыкания сопровождается звуковым сигналом зуммера. Если короткое замыкание длится более 1 с, то работа инвертора блокируется и спустя 3 с вновь возобновляется. Так выполняется функция антизалипания электрода.

При отсутствии короткого замыкания на вход RB4 подается низкий логический уровень, и частота инвертора определяется положением потенциометра R18.

Для защиты выходных ключей от перегрева используются в качестве датчиков два термостата TS1 и TS2. Если произошло отключение хотя бы одно-

го из термостатов, то работа инвертора блокируется. Зуммер издает прерывистый частый звуковой сигнал до остывания радиатора, на котором установлен сработавший термостат.

### Конструкция и детали

Резонансный дроссель L1 намотан на магнитопроводе ETD59, материал №87 фирмы EPCOS и содержит 12 витков медного провода диаметром 2 мм в лаковой изоляции. Провод наматывается с обязательным зазором между витками. Для обеспечения зазора можно использовать толстую нить. Для фиксации обмотки нужно промазать витки эпоксидным клеем. Половинки магнитопровода стыкуются с немагнитным зазором 1...2 мм. Более точное значение немагнитного зазора подбирается при настройке резонансной частоты. Во время работы инвертора магнитопровод резонансного дросселя может сильно нагреваться. Это связано с насыщением феррита при работе в резонансе. Для обеспечения надежной фиксации зазора магнитопровода его половинки должны стягиваться металлическими шпильками. При этом необходимо обеспечить расстояние от зазора до шпилек не менее 5 мм. Иначе в месте зазора шпильки могут расплавиться. По этой же причине недопустимо стягивать дроссель сплошным металлическим кожухом.

Трансформатор T1 намотан на магнитопроводе E65, материал №87 фирмы EPCOS. Сначала в один ряд мотают первичную обмотку – 18 витков медного провода диаметром 2 мм в лаковой изоляции. Поверх первичной обмотки мотают обмотки II и III. Каждая из них занимает половину каркаса. Обмотки II и III содержат по 3 витка в четыре медных провода диаметром 2 мм. Половинки магнитопровода трансформатора стыкуют без зазора и надежно фиксируют.

Дроссель L2 содержит 20 витков монтажного провода сечением 1,5 мм<sup>2</sup>, намотанных на ферритовом кольце K28x16x9. Трансформатор T2 мотают на феррите Ш5х5 с проницаемостью 2000 НМ. Половинки магнитопровода стыкуют с зазором 0,1...0,2 мм. Обмотка I содержит 180 витков провода ПЭВ-1 диаметром 0,2 мм. Обмотку II мотают в один ряд, содержит 47 витков такого же провода. Обмотки III, IV

№	Обозначение	Назначение
18	RA1	Цифровой вход команды от термостатов. Высокий логический уровень - один или оба контакта термостатов разомкнуты, низкий - контакты обоих термостатов замкнуты.
1	RA2	Аналоговый вход модуля компараторов. Напряжение на этом входе определяет позицию задания сварочного тока. Всего 17 позиций.
3	RA4	Цифровой выход зуммера. Высокий логический уровень - зуммер отключен, низкий - включен.
8	RB2	Цифровые выходы управления драйверами. Одинаковые логические уровни выводов RB2 и RB3 приводят все драйвера в неактивное состояние. Разные логические уровни выводов RB2 и RB3 активируют драйвера одной из диагоналей моста инвертора.
9	RB3	
10	RB4	Цифровой вход детектора короткого замыкания. Высокий логический уровень - короткое замыкание выхода инвертора (напряжение в сварочных проводах ниже 9 В), низкий - короткого замыкания нет (напряжение в сварочных проводах выше 9 В).
11	RB5	Цифровой выход включения реле. Высокий логический уровень - включение реле, низкий - отключение реле.
12	RB6	Цифровой вход кнопки уменьшения частоты в режиме настройки. Высокий логический уровень - кнопка отпущена, низкий - кнопка нажата.
13	RB7	Цифровой вход кнопки увеличения частоты в режиме настройки. Высокий логический уровень - кнопка отпущена, низкий - кнопка нажата.

и V содержат по 33 витка провода ПЭВ-1 диаметром 0,25 мм. Между обмотками нужно проложить 2 слоя изоляции (например, малярный скотч). Фазировка подключения обмоток указана на схеме.

Резонансные конденсаторы С1–С10 допустимо применять только качественные, пленочные на напряжение не менее 1000 В. Предпочтительнее использовать конденсаторы типа К78-2. Такого же типа должен быть блокирующий конденсатор С15.

Блок питания в настройке не нуждается и при исправных деталях начинает работать сразу. Необходимо только проконтролировать величины напряжений для питания драйверов 16...17 В. При проверке блока питания на его входные клеммы GND и +300 В можно подать сетевое напряжение 220 В. Таким же образом следует запитывать блок питания при настройке резонансной частоты.

Во время работы инвертора все его силовые элементы нагреваются. От того, как грамотно обдуваются эти элементы, будет зависеть время непрерывной работы аппарата и его долговечность. Существенные радиаторы нужно предусмотреть для входного выпрямителя VD14–VD21, транзисторов VT1–VT4 и выходного выпрямителя VD6, VD7. В обдув необходимо поставить также резонансный дроссель L1, сварочный трансформатор T1 и диоды удвоителя VD10–VD13. Защитные термостаты TS1 и TS2 типа KSD250V устанавливаются на радиаторы верхних ключей и выходных диодов. Все остальные элементы инвертора в обдуве и радиаторах не нуждаются.

Перед установкой МК в плату его необходимо запрограммировать (прошить). Файл прошивки контроллера в формате .HEX можно скачать с сайта издательства «Радиоаматор» [1].

#### Настройка резонансной частоты

Для настройки инвертора необходим ЛАТР и нагрузочный реостат сопротивлением 0,15 Ом. Реостат должен выдерживать кратковременное протекание тока до 200 А. Зазор магнитопровода резонансного дросселя выставляют примерно 1 мм. Между контактами 3 и 4 оптопары DA8 устанавливают перемычку. Устанавливают «прошитый» микроконтроллер в блок управления. Блок питания при настройке следует запитать отдельно. Для этого, не включая аппарат в сеть, на провода GND и +300 В блока питания нужно подать сетевое напряжение 220 В. Силовая часть пока обесточена. После включения питания спустя 5 с должен включиться зуммер, затем звук должен прекратиться, и включиться реле. Нажимаем одновременно обе кнопки SB1 и SB2. Удерживаем кнопки до появления звукового сигнала зуммера. Отпускаем кнопки. Непрерывный звук прекратится, и зуммер начнет издавать прерывистый сигнал с периодом примерно 2 с. Это соответствует режиму настройки резонансной частоты. Если все так, то с помощью осциллографа контролируем наличие двуполярных импульсов между затворами транзисторов VT2 и VT4 частотой 30 кГц амплитудой

не менее 15 В и ступенькой мертвого времени 2 мкс. Такой же сигнал должен быть между затворами VT1 и VT3. Если все так, запитываем силовую часть через ЛАТР и выставляем напряжение 20...30 В.

К сварочным проводам можно включить лампочку на 12 В. Если лампочка светится, включаем в сварочные провода реостат сопротивлением 0,15 Ом и вольтметр постоянного тока. Выставляем на ЛАТРе напряжение 30...40 В и начинаем настройку. Кнопкам SB1 и SB2 уменьшаем или увеличиваем частоту инвертора. Пределы изменения частоты 30...42 кГц. Подстраивая частоту кнопками, добиваемся максимального напряжения на реостате. Если напряжение продолжает увеличиваться при уменьшении частоты до 30 кГц, то необходимо увеличить зазор в магнитопроводе резонансного дросселя и повторить настройку снова. Если при увеличении частоты до 42 кГц напряжение на реостате продолжает расти, необходимо уменьшить зазор в магнитопроводе резонансного дросселя и повторить настройку снова.

Нужно добиться резонанса, т.е. настроить схему так, чтобы увеличение или уменьшение частоты инвертора приводило бы к уменьшению напряжения на реостате. При указанных на схеме элементах предпочтительней всего добиться такого зазора в резонансном дросселе, чтобы резонанс с нагрузкой 0,15 Ом возникал на частоте 33...37 кГц. Резонанс на большей частоте увеличит максимальный сварочный ток, но ключи и выходные диоды будут работать на пределе.

Как только резонансная частота настроена, нажимаем обе кнопки одновременно. После продолжительного звукового сигнала произойдет запись значения резонансной частоты в энергонезависимую память микроконтроллера. Вращая потенциометр R18, проверяем работу частотного регулирования. Минимальная частота должна быть равна резонансной. При вращении потенциометра изменение частоты должно сопровождаться коротким звуковым сигналом (всего 17 ступеней).

Если все происходит именно так, собираем полностью схему инвертора. Удаляем перемычку между контактами 3 и 4 оптопары DA8. Включаем инвертор в сеть. Через 5 с прозвучит сигнал зуммера, затем включится реле, и звук прекратится. Потенциометром R18 выставляем минимальную частоту (она же  $f_{\text{МАКС. МОЩНОСТИ}}$ ), соответствующую максимальному току. Кратковременно нагружаем инвертор реостатом сопротивлением 0,15 Ом и измеряем напряжение в нагрузке. Если это напряжение превышает 23 В, то можно считать настройку завершенной. Если меньше, то следует увеличить зазор в магнитопроводе резонансного дросселя и повторить настройку сначала.

#### Ссылки

1. <http://www.ra-publish.com.ua/> – сайт издательства «Радиоаматор».