

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ С ПОДОГРЕВОМ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ТОКОМ ПАУЗЫ

<sup>1</sup>Крампит М.А., <sup>2</sup>Крампит А.Г.

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Юргинский технологический институт» (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета, Юрга, e-mail: savage\_jawa@mail.ru;

<sup>2</sup>АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», Фрязино, e-mail: akrampit@mail.ru

В статье рассмотрены особенности проектирования устройства для импульсно-дуговой сварки и наплавки в среде защитных газов плавящимся электродом с подогревом электродной проволоки током паузы. Предложена схема с двумя силовыми ключами, направляющими ток на два контактных наконечника. Для подогрева проволоки и формирования тока паузы использована схема импульсного последовательного стабилизатора понижающего типа. Показано влияние обратного диода на гашение всплесков обратного напряжения, способного вывести из строя диоды сварочного выпрямителя. Рассчитана рациональная частота широтно-импульсной модуляции для формирования тока паузы, позволяющая избавиться от звуковых эффектов на дуге, добиться минимальных размеров дросселя без необходимости применения специализированных дорогостоящих силовых ключей. Показан расчет параметров защитных цепей. Также не забыта и безопасность: между силовой и управляющей частью имеется гальваническая развязка. Приведены результаты испытания спроектированного устройства: осциллограммы, макрошлифы. Устройство показало высокую стабильность процесса сварки, который проходил на длинной дуге без коротких замыканий. Полученные наплавленные валики распиливались, протравливались и обрабатывались с помощью программы «КОМПАС-3D». Замеры подтверждали повышение соотношения наплавленного металла к общему объему металла и снижение тепловложения в изделие путем уменьшения зоны термического влияния.

**Ключевые слова:** импульсно-дуговая сварка, проектирование устройств, испытание, осциллограммы

## DESIGNING A DEVICE FOR PULSE-ARC WELDING WITH HEATING ELECTRODE WIRING PAUSE CURRENT

<sup>1</sup>Krampit M.A., <sup>2</sup>Krampit A.G.

<sup>1</sup>Yurga Institute of Technology, TPU affiliate Russia, Yurga, e-mail: savage\_jawa@mail.ru;

<sup>2</sup>Joint-Stok company «Research and production Corporation “Istok” named after A.I. Shokin»,  
Fryazino, e-mail: akrampit@mail.ru

The article deals with the design features of the device for pulsed arc welding and surfacing in a shielding gas melting electrode heated electrode wire current pause. A scheme with two power switches directing current to two contact tips is proposed. For heating the wire and the formation of the pause current, the scheme of the pulse serial stabilizer of the step-down type is used. The effect of the reverse diode on the damping of the reverse voltage bursts capable of disabling the diodes of the welding rectifier is shown. The rational frequency of pulse-width modulation is calculated for the formation of the pause current, which allows to get rid of the sound effects on the arc, to achieve the minimum size of the throttle without the need for specialized expensive power switches. Calculation of parameters of protective circuits is shown. Also, safety is not forgotten: between the power and control part there is a galvanic isolation. The results of testing designed devices: waveform, macrosections. The device showed high stability of the welding process, which took place on a long arc without short circuits. Received the weld rollers has been divided, etching and processed using the program «COMPASS-3D». Measurements confirmed an increase in the ratio of the deposited metal to the total metal volume and a decrease in heat input into the product by reducing the heat affected zone.

**Keywords:** pulse arc welding, device design, testing, waveforms

Практически все современные процессы для импульсно-дуговой сварки направлены на сварку и не могут решить проблемы, связанные с увеличением производительности наплавки и снижением перемешивания наплавленного слоя с основным металлом. Это приводит к тому, что при наплавке поверхностей с особыми свойствами приходится наплавлять до пяти слоев для получения наплавленного слоя с низкой долей включения основного металла.

Для решения данной проблемы предложено внедрить дополнительный кон-

тактный наконечник для предварительного нагрева электродной проволоки током паузы, что позволяет снизить энергию, необходимую для ее расплавления. Доля включения основного металла в наплавленном слое не превышает 10% при повышенном коэффициенте расплавления (до 42 г/А·ч) [1].

Цель исследования: спроектировать устройство, реализующее процесс импульсно-дуговой сварки и наплавки с предварительным нагревом электродной проволоки током паузы.

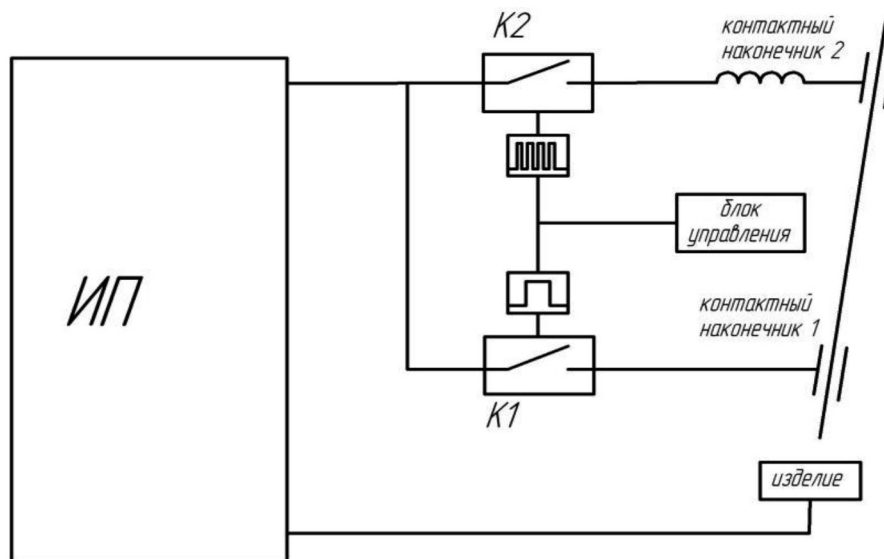


Рис. 1. Схема устройства, реализующего процесс импульсно-дуговой сварки и наплавки с подогревом электродной проволоки: ИП – источник питания, K1 – ключ 1, K2 – ключ 2

### Результаты исследования и их обсуждение

Упрощенная схема устройства, реализующего данный процесс, приведена на рис. 1.

В основе схемы модулятора лежат два ключа K1 и K2, которые соединяют источник питания с двумя контактными наконечниками. На ключ K1 подаются одиночные импульсы длительностью несколько миллисекунд, открывающие ключ для протекания тока импульса через контактный наконечник 1. На ключ K2 подается ШИМ-сигнал с заданной частотой, лежащей в пределах от 3 до 20 кГц. Изменяя скважность ШИМ-сигнала, происходит и регулирование тока паузы, протекающего через контактный наконечник 2. Для сглаживания силового ШИМ-сигнала в постоянное значение тока используется дроссель.

В качестве силовых элементов можно применять реле, тиристор, транзистор.

Реле в качестве ключевого элемента при больших значениях силы тока не используют. При этом реле имеют большие размеры и затрачивают большую мощность при включении. Также реле имеют низкое быстродействие, а их контакты подвержены износу [2].

Тиристор позволяет коммутировать большие токи и имеет компактные размеры. Но тиристор целесообразно применять при импульсном токе, так как при постоянном токе усложняется схема, которая нужна для закрытия тиристора [3].

Транзистор лишен вышеперечисленных недостатков. Для использования транзистора в виде ключевого элемента выбор стоит между МДП транзистором и биполярным транзистором с изолированным затвором.

МДП транзисторы имеют большее сопротивление в открытом состоянии и не стойки к повышенным напряжениям. Так что для модулятора прием в качестве ключа биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT транзистор).

Начнем с проектирования цепи тока паузы. Возьмем схему импульсного последовательного стабилизатора понижающего типа (рис. 2) [4].

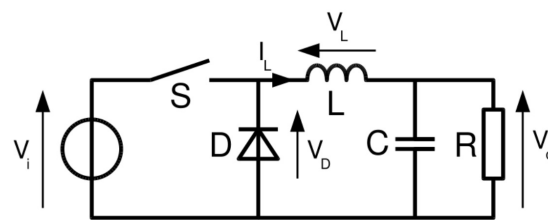


Рис. 2. Схема импульсного последовательного стабилизатора понижающего типа:

S – ключ, D – обратный диод,  
L – дроссель, C – конденсатор, R – нагрузка,  
 $V_i$  – напряжение источника питания,  
 $V_o$  – напряжение на нагрузке

Основными элементами схемы являются ключ S, дроссель L и конденсатор C, образующие LC фильтр и обратный диод D.

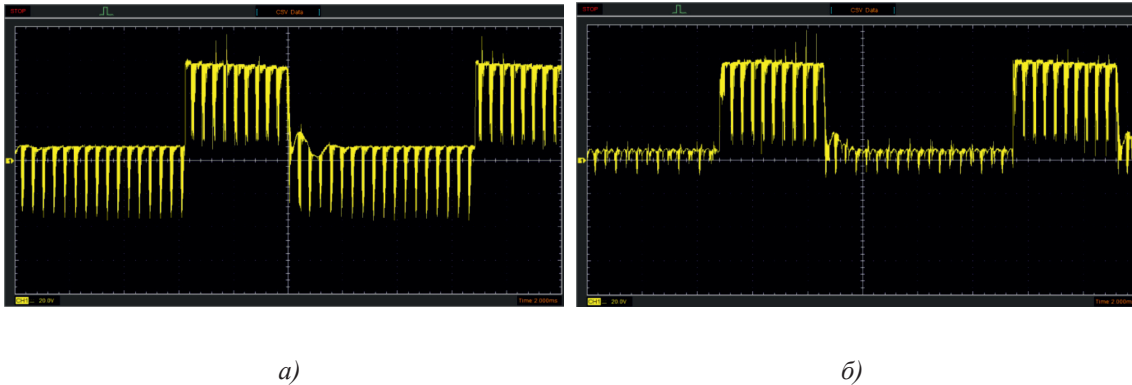


Рис. 3. Осциллограммы напряжения испытания устройства (20 В/дел, 2 мс/дел):  
а) без обратного диода; б) с обратным диодом

Для защиты от импульсов обратного напряжения, возникающих на индуктивности при переходных процессах, служит обратный диод D. Работу с обратным диодом и без него можно увидеть на рис. 3.

При сборке схемы появляется паразитная индуктивность проводов. Каждые 10 см провода имеют индуктивность 50 нГн. При монтаже схемы коллектор транзистора будет подключен к входной клемме проводом 15 см. Сам модулятор будет подключен к источнику питания проводом 50 см (в среднем необходимым для его нормальной установки). Итого на входе получается провод длиной 65 см и индуктивностью 325 нГн. Эта индуктивность находится в цепи коллектора и не имеет цепи разряда.

Расчет емкости снабберного конденсатора производится по следующей методике [4]. Для начала определяется величина данного всплеска напряжения.

Время закрытия транзистора составляет 40 нсек. Сила тока в импульсе при ряде режимов может достигать 400 А. При этом паразитный всплеск напряжения находится по формуле

$$U_{\text{пар}} = L_{\text{пар}} \frac{di}{dt},$$

где  $U_{\text{пар}}$  – величина всплеска напряжения паразитной индуктивности,  $L_{\text{пар}}$  – паразитная индуктивность контура,  $\frac{di}{dt}$  – скорость изменения силы тока при коммутации.

Подставив значения, получим паразитный всплеск напряжения равный 325 В. Так как при закрытии транзистора ток начинает течь через обратный диод, получается, что эмиттер транзистора становится подключен к минусовой клемме источника питания. Значит эти 325 В суммируются с напряже-

нием схемы, составляющем порядка 40 В. Итого, к транзистору прикладывается напряжение в 365 В.

Для того, чтобы снизить это напряжение до 80 В (напряжение х.х. источника питания), необходимо погасить следующую энергию:

$$Q_{\text{пар}} = \frac{L_{\text{пар}} i^2}{2},$$

где  $Q_{\text{пар}}$  – энергия всплеска паразитной индуктивности,  $i$  – сила тока в цепи до начала процесса коммутации.

Эта энергия должна быть поглощена конденсатором следующей емкости:

$$\frac{C \Delta U^2}{2} = \frac{L_{\text{пар}} i^2}{2},$$

откуда

$$C = \frac{L_{\text{пар}} i^2}{\Delta U^2},$$

где  $C$  – емкость конденсатора снаббера;  $U$  – разность между рабочим напряжением и напряжением всплеска.

Подставляя значения, получаем емкость конденсатора, равную 8 мкФ. Расчетное значение емкости снабберного конденсатора не стоит превышать, так как возрастают потери, а также снижается стабильность процесса сварки.

В качестве микроконтроллера применяется платформа Espruino на базе контроллеров ARM STM32F4, обладающего частотой чипа 168 МГц, и встроенным интерпретатором JavaScript, который поддерживает параллельные операции и облегчает отладку с компьютера.

Микроконтроллер выдает напряжение 5 вольт и ток 20 мА. Для нормальной работы транзистора в ключевом режиме же-

лательно подать двуполярное напряжение +15/-15 В. Также необходима гальваническая развязка, так как минус управления подключается к эмиттеру транзистора. Для гальванической развязки применяются оптодрайверы, а для получения двуполярного напряжения – DC-DC конвертеры. Но зачастую силовые ключи выходят из строя из-за повреждения силового затвора. Пробой цепи затвора может произойти от статического разряда, из-за возникновения генерации в контуре, образованном индуктивностью цепи управления и емкостями затвора, а также перенапряжения, наведенного со стороны схемы управления или силовых цепей вследствие емкостной или индуктивной связей. Для защиты от превышения напряжения затвор-эмиттер применяются два стабилитрона, включенные встречно [5].

На практике, для того, чтобы получить малые пульсации на выходе модулятора, необходимо иметь дроссель достаточно большой индуктивности. Для стабильного горения дуги сила тока на дуге не должна опускаться ниже 10 А. При минимальной силе тока паузы 30 А индуктивность дросселя должна составлять 8 мГн. Такой дроссель будет очень громоздкий, тяжелый и относительно дорогой. Повышение частоты тоже не даст значительного эффекта, так как при высоких частотах возрастает потеря в сердечнике, он сильнее нагревается. Дроссели на пластинах из расплавленного железа не применяются на частотах выше 4 кГц.

Также, при небольшой индуктивности, велики пульсации тока, что вызывает звуковой эффект как самой дуги из-за колебаний ширины столба дуги, так и дросселя из-за явления магнитострикции.

Выходом из сложившейся ситуации служит увеличение частоты ШИМ до 20 кГц. Повышение частоты свыше 20 кГц не имеет смысла, так как значительно возрастает стоимость самих IGBT-модулей. Также высокочастотные токи имеют скин-эффект, что приводит к необходимости изменения сечения проводника на ленту или трубку.

При повышении частоты возрастают потери на переключение. В среднем модули при коммутации 100 А на один цикл переключения тратят энергию 20 мДж. На частоте 20 кГц эта энергия будет равняться 400 Дж/с или 400 Вт.

Рассчитаем схему модулятора для регулирования тока паузы в пределах 30–70 А при напряжении паузы 16 В. Напряжение на входе примем от 30 до 40 В. Рассчитаем сначала для тока в 30 А.

Для расчета воспользуемся бесплатным приложением от компании Texas Instruments Power Stage Designer Tool. Выберем в нем схему понижающего конвертера. Падение напряжения на обратном диоде возьмем из характеристики чоппера МТКИД-100-12К, равное 1,65 В. Это необходимо для расчета потерь на обратном диоде.

Коэффициент пульсаций тока для стабильного горения примем равным 10%.

Необходимая величина индуктивности дросселя равна 170 мкГн. Для снижения пульсаций величина дросселя была принята равной 200 мкГн. Величина пульсаций для тока 30 А составляет 1,96 А, чего более чем достаточно для стабильного горения дуги. Потери мощности на обратном диоде составляют 23 Вт, что составляет 4,6% от входной мощности.

Само устройство было апробировано на лабораторной установке, в состав которой входит:

- сварочный источник питания с жесткой внешней характеристикой ВДУ-504У3 с уменьшенной индуктивностью;
- сварочная горелка ГСП-2;
- источник импульсов сварочного тока – модулятор;
- блок управления сварочными процессами БАРС-2В с пультом управления;
- осциллограф Agilent 1000 Series с шунтом.

Устройство показало высокую стабильность процесса (рис. 4). Процесс сварки происходил без коротких замыканий. Сниженные по амплитуде импульсы не вызывали резких изменений длины дуги.

Производилась наплавка валика на образцы, имеющие размер 300x150, толщиной 5 мм. Марка стали Ст3. В качестве защитного газа применялся CO<sub>2</sub>. Проволока марки Св-08Г2С, диаметром 1,2 мм.

После наплавки проводилась визуальная оценка швов на наличие видимых дефектов. Далее образцы распиливали на ленточной пиле, шлифовали и проводили травление в спиртовом растворе азотной кислоты.

Шлифы фотографировали при помощи макросъемки. Замеры производились по фотографии в программе КОМПАС 3D. Макрошлиф наплавленного валика представлен на рис. 5.

Таким образом, проведенные исследования показали, что спроектированное устройство позволяет добиться стабильности процесса импульсно-дуговой сварки и наплавки с подогревом электродной проволоки и увеличить долю наплавленного металла в общем объеме шва.

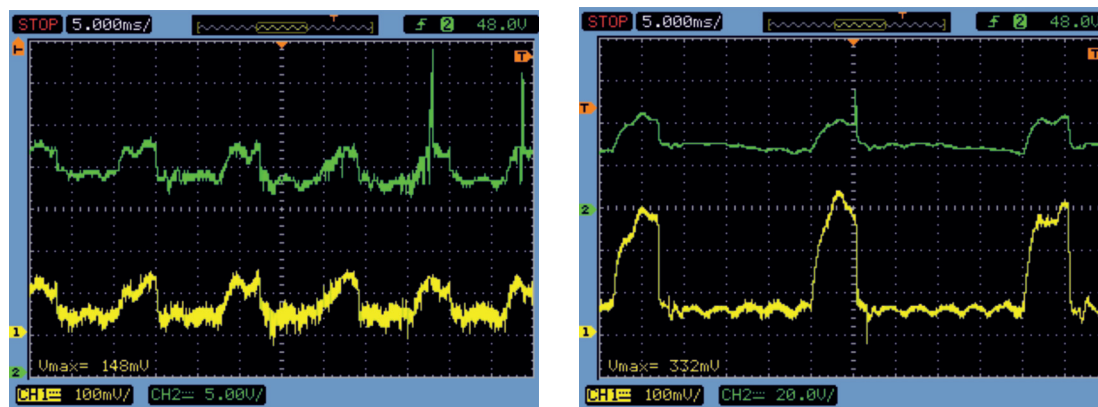


Рис. 4. Осциллограммы тока (желтая линия) и напряжения (зеленая линия) процесса сварки с подогревом электродной проволоки

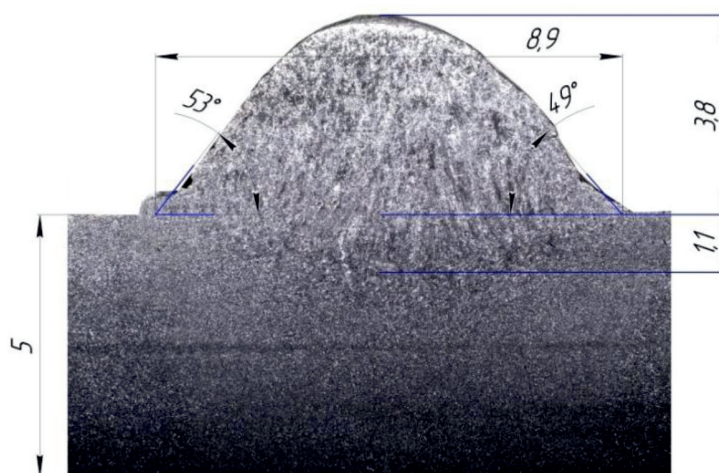


Рис. 5. Макрошлиф наплавленного валика

#### Выводы

1. При проектировании схемы необходимо учитывать индуктивность сварочного контура, так как даже индуктивности меньше 0,5 мкГн при высоких скоростях коммутации приводят к большим всплескам напряжения. Необходимо рассчитывать и включать в цепь безындуктивные конденсаторы емкостью, достаточной для погашения энергии этого всплеска.

2. Для защиты источника питания от всплесков обратной полярности необходима установка обратно включенного высокоскоростного диода, который перенаправляет обратный всплеск напряжения.

3. Для сглаживания ШИМ-сигнала в постоянный ток паузы необходимо применение дросселя.

4. Для защиты цепи управления необходимо использование оптодрайвера, обеспечивающего гальваническую развязку. Также необходима развязка управляющих цепей на разные контактные наконечники.  
*Проект реализуется при поддержке Фонда содействия инновациям.*

#### Список литературы

1. Крапит Н.Ю., Крапит М.А. Импульсно-дуговая сварка с подогревом вылета электрода в паузе // Сварочное производство. 2014. № 3. С. 8–10.
2. Гуревич В.И. Электрические реле. Устройство, принцип действия и применения. М.: Солон-Пресс, 2011. 688 с.
3. Бурбаева Н.В., Днепровская Т.С. Основы полупроводниковой электроники. М.: Физматлит, 2012. 312 с.
4. Семёнов Б.Ю. Силовая электроника. От простого к сложному. М.: Солон-Пресс, 2015. 416 с.
5. Колпаков А.И. IGBT: инструкция по эксплуатации, или об уважительном отношении к силовой электронике // Силовая электроника. 2007. № 1. С. 17–28.