

# ИНВЕРТОРНОЕ СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

АЛЕКСАНДР БАРДИН, к.т.н., директор НТЦ силовой электроники РГРТУ

*В статье сформулированы требования, предъявляемые к современному сварочному оборудованию двух основных классов: аппаратов для бытового использования и аппаратов промышленного применения. Основное внимание уделено построению инверторного сварочного оборудования для промышленного применения. Описаны схмотехнические методы, которые были положены в основу сварочных аппаратов инверторного типа разработанных в НТЦ силовой электроники при РГРТУ.*

Коллектив НТЦ силовой электроники при РГРТУ около 20 лет занимается разработкой инверторного сварочного оборудования. За этот период создан ряд источников тока для электродуговой сварки, которые серийно выпускаются на Рязанском государственном приборном заводе. В 1993 году было начато производство транзисторного аппарата для ручной дуговой сварки АСПТ-60, а затем АСПТ-90, АСПТ-120, АСПТ-180. В дальнейшем РГПЗ выпускал аппараты под торговой маркой «Фора», на сегодняшний день — под маркой «Форсаж». В настоящее время выпускаются следующие сварочные инверторы:

1. Для ручной дуговой сварки (ММА): «Форсаж-125», «Форсаж-160», «Форсаж-160М», «Форсаж-250», «Форсаж-250Gaz».
2. Для аргоно-дуговой сварки неплавящимся электродом (TIG): «Форсаж-160АД».
3. Для полуавтоматической сварки в среде защитных газов (MIG/MAG): «Форсаж-315», «Форсаж-315М», «Форсаж-500».
4. Конвертор «Форсаж-250ЧБ» для работы от многопостового выпрямителя в режиме ММА и TIG.
5. Аппарат воздушно-плазменной резки «Форсаж-120ПА».

Прежде чем перейти к рассмотрению принципов построения и схмотехники инверторных источников сварочного тока следует сформулировать требования, предъявляемые к современному сварочному оборудованию.

Все сварочные аппараты условно можно разбить на две группы: аппараты для бытового использования и аппараты промышленного применения. Оборудование первой группы как правило используется для ручной дуговой сварки при питании от однофазной сети 220 В, 50 Гц. Выходная вольтамперная характеристика (ВАХ) аппаратов этого типа имеет крутопадающий вид без жестких требований к ее наклону. Основным требованием к таким аппаратам является минимальная стоимость.

Более подробно следует остановиться на требованиях, предъявляемых ко второй группе.

Современные аппараты, предназначенные для ручной дуговой сварки должны обеспечивать:

- крутопадающую выходную ВАХ с возможностью регулирования наклона в зоне дуги в диапазоне 0,4...1,4 В/А (участок 3—4 рис. 1а);
- номинальный выходной ток не менее 250 А, напряжение холостого хода 70...100 В с переходом на безопасный уровень (не более 12 В) после обрыва дуги за время не более 0,6 с;
- функцию «горячего старта», т.е. увеличение сварочного тока до 180% по отношению к заданному на время до 2 с с момента поджига дуги;
- «форсирование дуги» — увеличение тока короткого замыкания от 1,2 до 2,2 значений тока дуги (участок 4—5 рис. 1а);
- «антиприлипание» — снижение тока до минимального значения при длительности короткого замыкания более 1 с;
- дистанционное управление;

- цифровую индикацию;
- предварительную установку параметров с высокой точностью.

Для аппаратов постоянного тока, работающих в режиме TIG (см. рис. 1б), требуется более широкий диапазон токов (минимальное значение 5 А), а также следует предусмотреть контактное и бесконтактное возбуждение дуги (наличие высоковольтного высокочастотного осциллятора). Кроме того, наклон выходной ВАХ должен быть не менее 3 В/А. Необходимо обеспечить автоматизацию сварочного процесса (главное увеличение или плавное уменьшение тока дуги, импульсное изменение тока дуги с заданной частотой и скважностью и т.п.).

Для аппаратов MIG/MAG требуется обеспечить «жесткую» выходную ВАХ с наклоном 0,04 В/А и возможностью его регулирования, номинальный сварочный ток не менее 300 А, диапазон регулирования напряжения 14...35 В (см. рис. 2а), возможность регулирования динамических характеристик аппарата (скорость нарастания

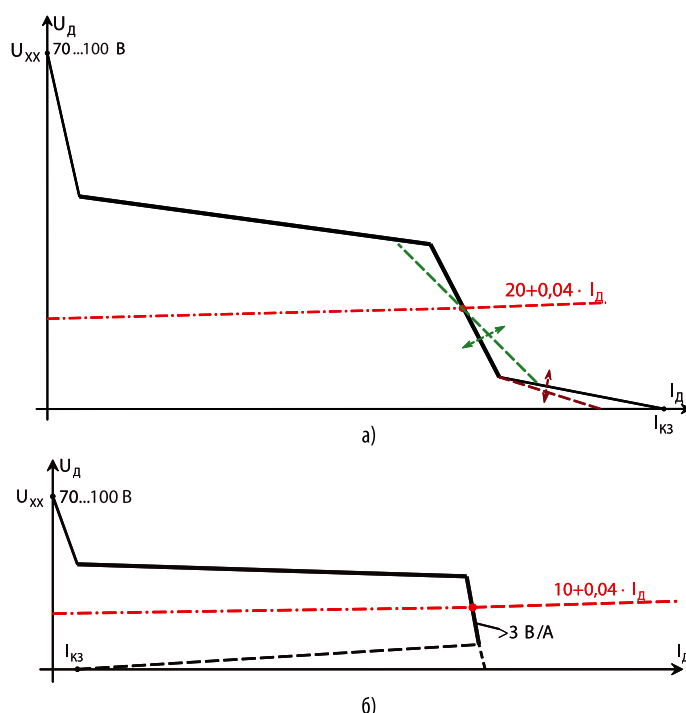


Рис. 1. ВАХ сварочных аппаратов ручной дуговой сварки (а) и работающих в режиме TIG (б)

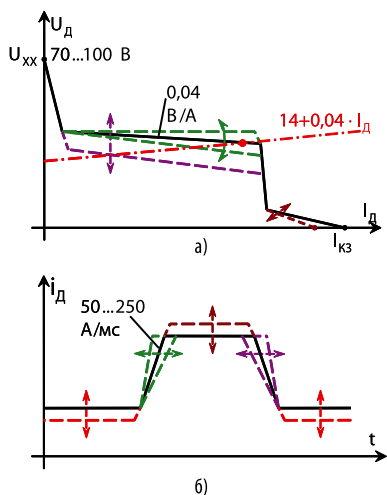


Рис. 2. Жесткая ВАХ аппаратов MIG/MAG (а) и возможность регулирования импульсов тока при работе в управляемом режиме (б)

тания и спада тока) (см. рис. 2б) и работу в управляемом импульсном режиме.

Эти требования определяют схему построения как силовой части сварочного инвертора, так и его системы управления.

В общем объеме сварочных работ доля работ, производимых в режиме MIG/MAG в Европе, составляет около 70%. В России основным видом сварки до сих пор является ручная дуговая, но доля автоматической и полуавтоматической сварки все время увеличивается.

Первые разработанные нами сварочные аппараты предназначались для ручной дуговой сварки и были выполнены на биполярных и БСИТ силовых транзисторах (КТ847, КП955). Силовой преобразователь выполнен по мостовой схеме с дросселями в цепях как переменного, так и постоянного тока (см. рис. 3). Для обеспечения безопасной работы биполярных транзисторов и снижения динамических потерь переключение силовых ключей осуществляется при нулевом напряжении (режим ZVS).

Амплитуда тока в диагонали такого преобразователя при одной и той же мощности незначительно превосходит амплитуду тока мостового преобразователя с жестким переключением (hard-switch). При этом отпирание силового ключа происходит при открытом возвратном диоде,

включенном параллельно ключу, что обеспечивает режим ZVS на этапе включения. При запираии ключа происходит плавное нарастание напряжения ключа за счет подключенного параллельно конденсатора (режим ZVS при выключении), что обеспечивает снижение динамических потерь выключения. Для режима ZVS нужно обеспечить непрерывность тока диагонали и достаточную его амплитуду, поэтому такой режим возможен только с определенного значения тока нагрузки.

Управление выходными параметрами может осуществляться следующими способами:

1. За счет изменения частоты работы преобразователя.
2. Широтно-импульсной модуляцией при обеспечении закороченного состояния диагонали преобразователя (разновидностью такого управления является фазоразностный способ).

В аппаратах «Форсаж» используется частотный способ регулирования (1). При изменении частоты работы меняется реактивное сопротивление силового дросселя, включенного в диагональ преобразователя последовательно с силовым трансформатором, что позволяет регулировать выходную мощность. В этом случае наименьшему значению выходной мощности соответствует наибольшая частота, а наибольшему значению — наименьшая частота. Коэффициент заполнения управляющих импульсов все время близок к единице и ток диагонали носит непрерывный характер. Основным недостатком такого способа управления является большая кратность изменения частоты для обеспечения широкого диапазона регулирования токов нагрузки.

На сегодняшний день на биполярных транзисторах производится один сварочный аппарат «Форсаж-125» с выходным током 140 А. В преобразователе используется пропорционально-токовое управление транзисторами, обеспечивающее их надежное насыщение и минимизацию потерь управления. Низкое напряжение насыщения и формирование траектории переключения позволяет получить малые потери на силовых транзисторах.

В последнее время произошло резкое сокращение числа производителей

биполярных транзисторов при одновременном увеличении номенклатуры IGBT- и МОП-транзисторов. Все остальные модели сварочных аппаратов выполнены на IGBT-транзисторах, но с сохранением частотного способа управления. Представляется целесообразным рассмотреть возможность применения ESBT-транзисторов (биполярных транзисторов с коммутацией по эмиттеру), разработанных фирмой STMicroelectronics.

При использовании второго способа регулирования частота работы преобразователя остается постоянной. Регулирование мощности осуществляется за счет широтно-импульсной модуляции, при этом в паузе импульсов управления обеспечивается закорачивание диагонали преобразователя. Разновидностью построения мостового преобразователя с таким управлением является преобразователь с фазоразностным регулированием (phase-shift PWM), работа которого подробно рассмотрена в (2). Режим ZVS при выключении силовых ключей обеспечивается емкостями, подключенными параллельно ключам. В одной стойке преобразователя перезаряд этих емкостей идет за счет энергии, накопленной и в дросселе переменного тока L1 (см. рис. 3) и в выходном дросселе преобразователя L2. В другой стойке перезаряд идет практически только за счет энергии дросселя переменного тока L1. Энергия, накапливаемая в дросселе переменного тока, значительно меньше энергии выходного дросселя. Поэтому при уменьшении тока нагрузки наступает момент, когда этой энергии недостаточно для полного перезаряда емкостей на этапе запираии силового ключа. В этом случае последующее открывание второго ключа этой стойки приводит к дозаряду конденсаторов через этот ключ, вызывая динамические потери на включение. Это ограничивает минимальную мощность, при которой существует режим ZVS. В (3) и (4) рассмотрено несколько вариантов, позволяющих существенно расширить диапазон выходных мощностей при сохранении режима ZVS.

В настоящее время закончены разработки транзисторных сварочных инверторов на токи 300 и 500 А (выходная мощность 10 и 20 кВт), построенных с управлением по принципу фазоразностной широтно-импульсной модуляции.

В силовом преобразователе применены оригинальные схемотехнические решения, позволившие сохранить режим ZVS во всем диапазоне нагрузок, начиная с холостого хода. Силовой преобразователь 500 А аппарата выполнен на IGBT-модулях. При разработке и изготовлении прототипа была проверена возможность применения как полномостовых, так и полумостовых

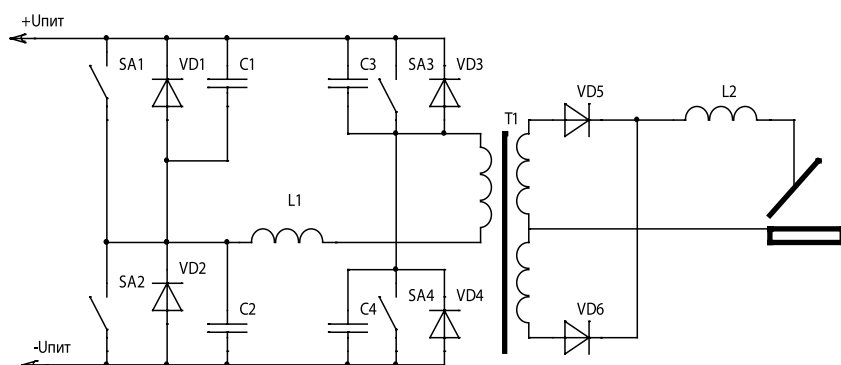


Рис. 3. Силовой преобразователь

модулей различных производителей (Eupes, Semikron, Microsemi (APT), Mitsubishi). Проведены исследования уменьшения потерь выключения для режима ZVS при использовании разных типов IGBT-транзисторов для различных значений токов и значений емкостей, подключенных параллельно транзистору. Для управления силовыми модулями применены драйверы управления фирм Concept и Infineon. IGBT, выполненные по разным технологиям (PT, NPT, LPT и т.д.) и изготовленные разными производителями, имеют различную эффективность при использовании режима ZVS при выключении транзистора (5). Особенностью выключения IGBT является наличие «хвостового» тока (tail current), на который может приходиться значительная доля потерь выключения (E<sub>off</sub>). У некоторых IGBT наблюдается увеличение времени протекания хвостового тока при уменьшении скорости нарастания напряжения коллектор-эмиттер. Поэтому невозможно точно рассчитать потери выключения и требуются прямые измерения мгновенных значений напряжений и токов транзистора. В (6) приведены графики зависимости энергии потерь выключения IGBT-модуля APTLGF75U120T для жесткого режима и режима ZVS при емкости конденсаторов, включенных между коллектором и эмиттером, равной 10 нФ.

При токе выключения 80 А, напряжении питания 600 В и температуре кристалла 125°C энергия потерь выключения в жестком режиме составляет 6,7 мДж, в режиме ZVS — 1,4 мДж. Измерения показывают, что наибольший выигрыш получается при использовании быстрых IGBT, выполненных по PT-технологии. На рисунке 4 приведены графики мгновенных значений напряжения коллектор-эмиттер, тока коллектора и мощности для жесткого переключения, а на рисунке 5 — для режима ZVS, построенные для силового модуля APTGF150H120G при величине емкости формирования переключения 20 нФ.

Как видно из графиков, при использовании режима ZVS происходит не только уменьшение общей энергии потерь выключения, но и существенное уменьшение пиковой мгновенной мощности (примерно в 5 раз), что повышает надежность работы силового транзистора.

Вопросы, связанные со схемой построения системы управления сварочным инвертором, следует рассмотреть отдельно.

Положение рабочей точки дуги на ВАХ по ГОСТ Р МЭК 60974-1-2004 определяется выражениями (см. рис. 1 и 2, штрихпунктирная линия):  $U_d = 0,04 \cdot I_d + 20В$  — для ручной дуговой сварки;  $U_d = 0,05 \cdot I_d + 14В$  — для сварки MIG/MAG и  $U_d = 0,04 \cdot I_d + 10В$  — для сварки TIG.

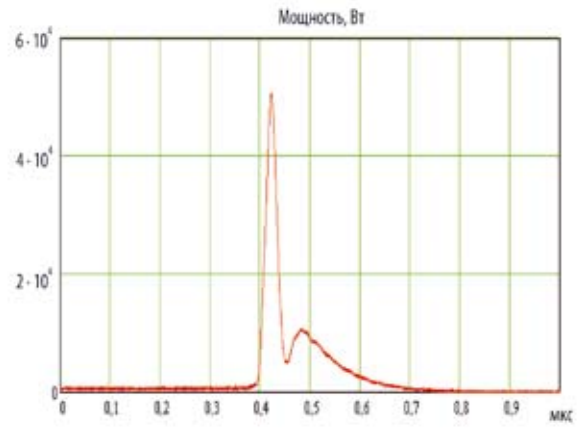
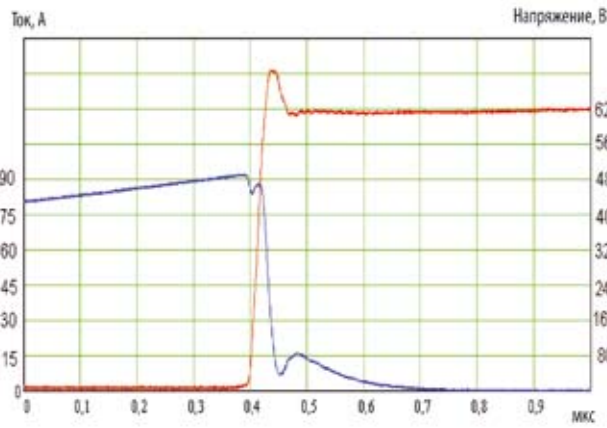
Предельная (участок 2—3 рис. 1) ВАХ аппарата должна лежать выше этой линии дуги во всем диапазоне токов нагрузок при минимальном напряжении питания преобразователя. Этот участок определяет значение коэффициента трансформации для основной вторичной обмотки силового трансформатора Т1 и максимальное значение дросселя переменного тока L1 (рис. 3) и описывается приближенным выражением:

$$I_{\text{Вых}} \approx \frac{U_{\text{пит}} - n \cdot U_{\text{Вых}}}{4 \cdot L1} \cdot n \cdot T,$$

где  $n$  — коэффициент трансформации.

Для получения напряжения холостого хода с уровнем не менее 70 В целесообразно введение дополнительной обмотки (вольтодобавки) с дросселем ограничения тока (участок 1—2 ВАХ).

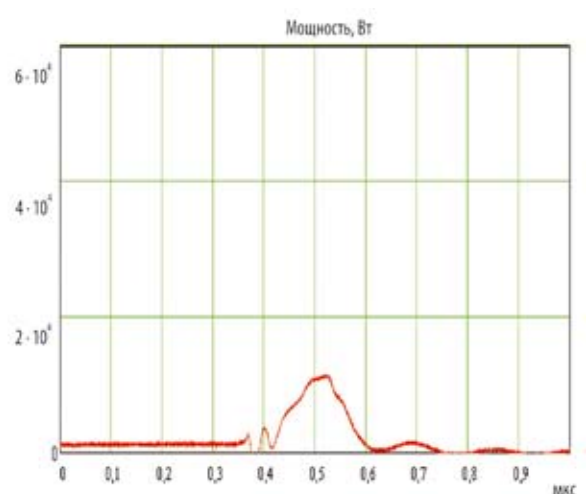
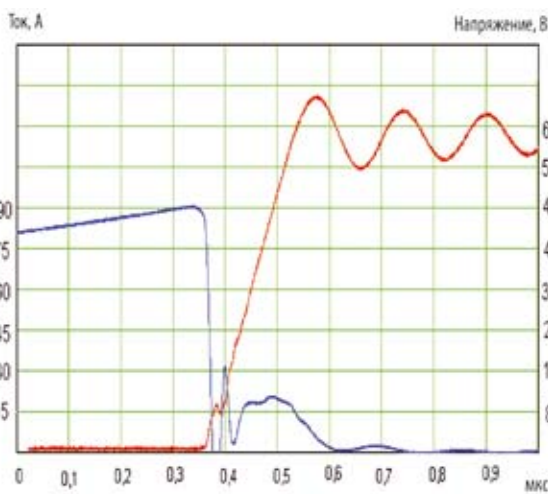
В простейших аппаратах для ручной дуговой сварки формирование участка 3—4 ВАХ с возможностью его управления достаточно просто реализуется путем сравнения мгновенного тока на первичной стороне преобразователя с регулируемым пороговым значением (см. рис. 6). Изменение наклона ВАХ можно получать за счет суммирования мгновенного тока с пилообразным напряжением. В этом случае увеличение амплитуды пилообразного напряжения снижает общий коэффициент усиления системы и уменьшает наклон ВАХ.



а)

б)

Рис. 4. Процесс коммутации при жестком переключении. Мгновенные значения напряжений коллектор-эмиттер и тока транзистора (а) и мощности, рассеиваемой транзистором (б)



а)

б)

Рис. 5. Процесс коммутации в режиме ZVS. Мгновенные значения напряжений коллектор-эмиттер и тока транзистора (а) и мощности, рассеиваемой транзистором (б)

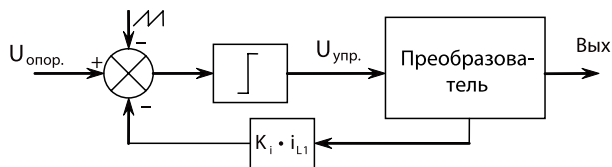


Рис. 6. Структурная схема управления для ручной дуговой сварки

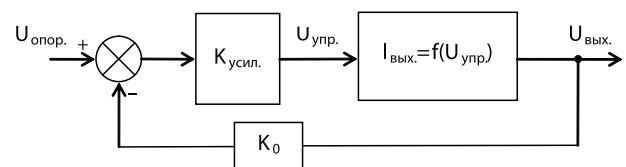


Рис. 7. Структурная схема управления для режима MIG/MAG

Для режима MIG/MAG и получения «жесткой» характеристики (см. рис. 2а) в простейшем случае используется обратная связь только по выходному напряжению (см. рис. 7). При этом уменьшение коэффициента усиления усилителя рассогласования будет приводить к увеличению наклона (уменьшению «жесткости») ВАХ. По такому принципу сделан сварочный инвертор для полуавтоматической сварки «Форсаж-315».

В этом случае наклон ВАХ находится в обратной пропорциональной зависимости от коэффициента усиления  $K_{\text{усил.}}$  усилителя сигнала рассогласования. Оперативная регулировка наклона ВАХ приводит к одновременному изменению установленного значения  $U_{\text{вых.}}$ . Основным недостатком такого способа заключается в том, что приходится очень тщательно проектировать тракт передачи напряжения ошибки исходя из повторяемости и долговременной стабильности  $K_{\text{усил.}}$ . Например, применять гальваническую развязку при помощи оптопар нельзя, поскольку их коэффициент передачи может уменьшаться до двух раз в течение первого года эксплуатации.

Для аппаратов профессионального класса, в которых требуется обеспечение таких функций как «горячий старт», «форсирование дуги», установка заданного и индикация текущего значений сварочного тока, регулирование наклона ВАХ и т.п., необходимо использовать двумерную систему обратных связей и производить непосредственное измерение выходного тока и напряжения с формированием требуемого управляющего напряжения (см. рис. 8).

Для такой системы напряжение ошибки будет составлять:

$$\varepsilon = U_{\text{опор.}} - (K_0 \cdot U_{\text{вых.}} + R_0 \cdot I_{\text{вых.}}),$$

где  $R_0$  — коэффициент передачи датчика выходного тока.

При достаточно большом значении коэффициента передачи системы можно считать, что  $\varepsilon \rightarrow 0$ , тогда в установившемся режиме  $U_{\text{опор.}} = K_0 \cdot U_{\text{вых.}} + R_0 \cdot I_{\text{вых.}}$ , следовательно, наклон выходной характеристики  $R_{\text{накл.}} = R_0 / K_0$ .

К сожалению, и в этой системе регулировка заданного тока или напряжения и наклона ВАХ не получается независимой,

поэтому при оперативной регулировке параметров приходится менять все коэффициенты, рассчитывая их, например, при помощи микроконтроллера. Если использовать в многомерной системе звенья с насыщением, можно получить ВАХ с изломами, например для организации такой функции, как «форсирование дуги». По такому принципу работают все современные инверторы серии «Форсаж».

Формирование высококачественных динамических характеристик сварочного инвертора предполагает знание точных характеристик преобразователя, которые различны для разных способов управления, поэтому общие рекомендации сформулировать сложно. Однако следует заметить, что большинство современных перспективных методов электродуговой сварки предполагает управление переносом металла и при проектировании аппаратов промышленного применения разработчик должен предусматривать возможность управления динамическими характеристиками инвертора.

В связи с этим, на современном этапе развития цифровой схемотехники представляется разумным построение систем управления преобразователем, а возможно и полностью сварочного инвертора, на основе специализированных цифровых сигнальных контроллеров.

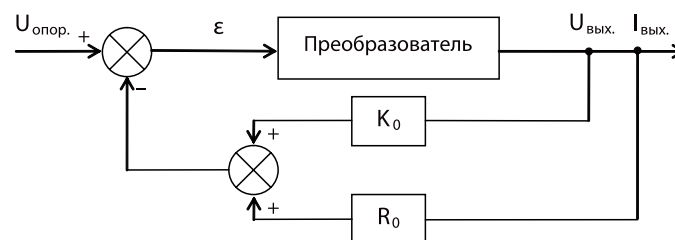


Рис. 8. Структурная схема управления с двумерной ОС

Следует отметить, что задача создания современного сварочного оборудования для электродуговой сварки требует знаний не только в области силовой электроники и микропроцессорной техники, но и знаний физических процессов, протекающих в электрической дуге. Это требует обязательного привлечения к разработке оборудования специалистов в области технологии сварки.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Патент РФ №2018424, Источник питания сварочной дуги постоянного тока. БИ №16, 1994. Бардин А.И., Мишачев А.П., Романов А.В.
2. Improving the Full-bridge Phase-shift ZVT Converter for Failure-free Operation Under Extreme Conditions in Welding and Similar Applications. Hubert Aigner — Fronius Schweissmaschinen KG A-4600 Wels-Thalheim, Austria, Kenneth — Dierberger Advanced Power Technology Inc Bend, Oregon 97702 USA, Denis Grafham — Advanced Power Technology Inc, B-1330 Rixensart, Belgium, 1998г. АРТ.

3. A New ZVS-PWM Full-Bridge Converter Yungtaek Jang and Milan M. Jovanović; Delta Products Corporation, Power Electronics Laboratory, Research Triangle Park, NC 27709, U.S.A., 2004.

4. A New PWM ZVS Full-Bridge Converter Yungtaek Jang and Milan M. Jovanović, Power Electronics Laboratory, Delta Products Corporation, P.O. Box 12173, 5101 Davis Drive, Research Triangle Park, NC 27709, 2006.

5. Рекомендации по применению силовых полупроводниковых приборов. Приложение на сайте [www.semikron.com](http://www.semikron.com).

6. APTLGF75U120T. Data sheet.

7. Особенности сварочно-технологических свойств универсальных источников сварочного тока нового поколения инверторного типа, выпускаемых на ГРПЗ, для ручной и полуавтоматической сварки при строительстве и ремонте газопроводов. Материалы отраслевого семинара-совещания «Состояние сварочного производства газотранспортных и газодобывающих обществ ОАО ГАЗПРОМ» Москва, 2004.