



ТРАНЗИСТОРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ (ОБЗОР)

А. В. ЛЕБЕДЕВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны наиболее распространенные схемы транзисторных источников питания электрической дуги. Рассмотрены особенности параллельной работы транзисторов, способы защиты от перенапряжений и формирования траектории переключения, современные драйверы, конструкции высокочастотных трансформаторов, корректоры мощности, системы управления плавлением и переносом электродного металла.

Ключевые слова: электродуговая сварка, источник питания, транзистор, трансформатор, система управления, плавление и перенос металла

Ведущие производители сварочного оборудования в основном изготавливают источники питания для электродуговой сварки транзисторного типа. Тиристорные выпрямители и выпрямители со ступенчатым переключением напряжения выпускаются в небольших количествах. Транзисторные источники имеют небольшую массу и габариты, высокую точность регулирования и быстродействие. Простейшим транзисторным источником является источник на основе импульсного регулятора (чоппера) (рис. 1). По сравнению с инверторными источниками транзисторы работают при существенно меньших напряжениях без сквозных токов, схема управления намного проще, отсутствует высокочастотный трансформатор. Чопперные источники генерируют относительно небольшие помехи и мало искажают напряжение сети, коэффициент мощности близок к 1. Недостатком является большая масса. Чопперный источник Origo Mig 4002c (ESAB) на 400 А имеет массу 139 кг. Масса инверторного источника Origo Mig 4001i на такой же ток равна 43,5 кг. Один из первых транзисторных чопперных источников, выполненный в Украине в 1972 г. в Институте электродинамики по заказу Института электросварки им. Е. О. Патона, был предназначен для сварки в космосе плавящимся электродом. Максимальный ток составлял 300 А, питание 27 В от бортовой сети космического корабля. В 1980-х годах Институт электродинамики разработал чопперные источники на 500 А для многопостовой полуавтоматической сварки в судостроении [1]. Для исследования переноса металла при сварке плавящимся электродом был изготовлен источник на 1000 А, который снижал потери металла на разбрызгивание до 0,5 % при сварке в углекислом газе [2, 3].

Использование в чоппере двух транзисторов и высокочастотного трансформатора дает возмож-

ность отказаться от сетевого трансформатора (рис. 2). Другие названия такой схемы — однотактный преобразователь, асимметричный мост, «косой» мост [4–6]. Использование такой схемы устраняет причины, вызывающие сквозные токи и несимметричное намагничивание высокочастотного трансформатора. Поэтому в начальный период развития инверторных источников «косые» мосты были очень популярны. Сейчас значительная доля источников выполняется по этой схеме. Уменьшение пульсаций выходного напряжения и повышение мощности достигается работой двух «косых» мостов на одну нагрузку (рис. 3). Недостаток «косого» моста — увеличенная в два раза масса высокочастотного трансформатора — устраняет полумостовая схема (рис. 4). Такая схема наиболее часто применяется в источниках мощностью несколько киловатт и сетевым напряжением 220 В. Однако в ней существует возможность прохождения сквозного тока через транзисторы, что может вывести инвертор из строя. Другим недостатком является увеличенная

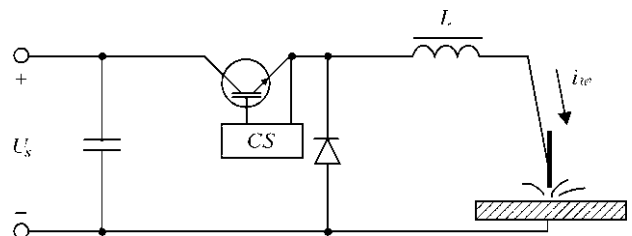


Рис. 1. Схема понижающего импульсного регулятора (чоппера)

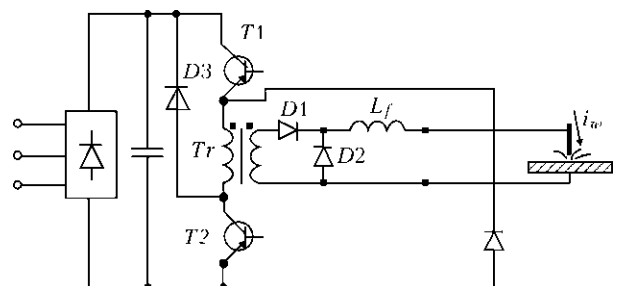


Рис. 2. Схема асимметричного («косого») моста

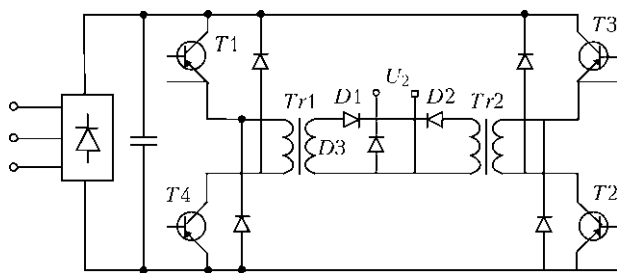


Рис. 3. Схема источника питания, состоящая из двух асимметричных мостов

в два раза токовая нагрузка на транзисторы по сравнению с мостовой схемой (рис. 5). В Институте электродинамики опытный образец мостового сварочного инвертора с питанием от сети 380 В был выполнен в 1982 г. Отсутствие в то время надежно работающих транзисторов на напряжения более 600 В не позволило внедрить его в серийное производство. Эта проблема полностью не решена даже сейчас. Максимально допустимый ток наиболее популярных IGBT транзисторов при температуре корпуса 25 °С 50 А. С повышением температуры до 100 °С ток заметно падает. Для надежной работы транзисторов их необходимо загружать не более чем на 30...50 % от максимально допустимого тока. Поэтому даже в источниках с питанием от напряжения 220 В и сварочным током 120 А часто используют параллельное включение транзисторов, которое начали использовать еще в 1950-е годы [7]. Надежность такого соединения может быть меньше, чем надежность одного транзистора, так как возрастает количество полупроводниковых кристаллов и паек. Чтобы не уменьшать, а увеличить надежность параллельного соединения, в Институте электродинамики был предложен способ глубокого резервирования. В начале 1960-х годов с использованием этого способа был выполнен транзисторный коммутатор на ток 100 А [8]. Параллельно было соединено 1000 (тысяча!) германиевых транзисторов, каждый из которых имел максимально допустимый ток 0,4 А. Транзисторы проходили предварительную сортировку по падению напряжения. Соединяли параллельно транзисторы с одинаковым падением напряжения, что уменьшало разброс тока между транзисторами. Кроме того, в цепь эмиттера и базы каждого транзистора включали предохранители. Отказ транзистора вызывал сгорание предохранителей и его отключение. Ток, который коммутировал отказавший транзистор, перераспределялся между оставшимися транзисторами. Так как все транзисторы даже в случае коммутирования максимального тока работали существенно недогруженными, то увеличение тока на 1/1000 не снижало надежности работы. Теоретические исследования и эксперименты подтвердили высокую надежность такого соединения. В современных сварочных источниках способ глубо-

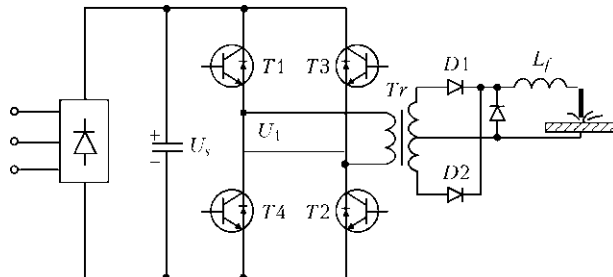


Рис. 5. Схема мостового инвертора

кого резервирования не используется, поэтому отказ одного транзистора может вывести источник из строя.

При конструировании высокочастотных силовых трансформаторов необходимо решить две основные проблемы: получить минимальную индуктивность рассеяния и принять меры по устранению влияния поверхностного эффекта в проводниках. Индуктивность рассеяния вызывает паузы в выпрямленном напряжении, которые снижают эффективность источника [9]. Наиболее простой способ борьбы с индуктивностью рассеяния — использовать ее как индуктивность в резонансном источнике питания. В остальных случаях следует уменьшать индуктивность путем минимизации расстояния между обмотками и их секционированием. В современных источниках используется частота от 20 до 80 кГц. Магнитопроводы трансформаторов изготавливают из феррита. Глубина проникновения тока в проводник на таких частотах составляет от 0,5 до 0,34 мм. Поэтому имеет смысл использовать провода с поперечными размерами не более 1...2 мм. В источниках мощностью несколько киловатт токи относительно небольшие, поэтому первичная обмотка мотается проводом круглого сечения. Во вторичной обмотке используется параллельное соединение проводов круглого или прямоугольного сечения [6, 10, 11]. Другим вариантом уменьшения влияния поверхностного эффекта является применение в качестве проводников литцендрата, который можно заменить одновременной намоткой параллельными проводниками. В трансформаторах большей мощности первичная обмотка мотается проводником прямоугольного сечения. Вторичная обмотка может быть изготовлена из медной изоли-

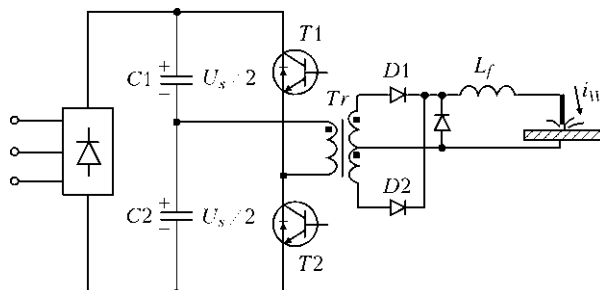


Рис. 4. Схема полумостового инвертора



рованной ленты с толщиной, равной удвоенной глубине проникновения тока и шириной, закрывающей всю первичную обмотку. По такой конструкции был сделан в 1982 г. для инверторного источника питания трансформатор броневое типа мощностью 15 кВт (ПВ = 100 %) массой 1 кг. Современные источники питания в основном используют броневые трансформаторы как наиболее технологичные, реже стержневые и кольцевые, хотя они уменьшают индуктивность рассеяния и улучшают условия охлаждения. Еще реже применяют наиболее технологичные кабельные трансформаторы. Для источника мощностью 3 кВт магнитопровод кабельного трансформатора состоит из нескольких ферритовых колец с площадью поперечного сечения 8 см², обмотками $w_1 = 12$ и $w_2 = 2$ витка [12, 13].

В современных источниках питания в основном используют IGBT транзисторы. Полевые транзисторы применяют намного реже. При параллельном соединении IGBT транзисторов транзистор, имеющий меньшее напряжение насыщения, пропускает больший ток и больше нагревается [14, 15]. Наибольшее влияние на надежность соединения оказывает знак температурного коэффициента напряжения насыщения (ТКНН). Если ТКНН имеет положительное значение, то в транзисторе с большим током увеличивается температура, падение напряжения возрастает, что приводит к уменьшению тока. Если ТКНН имеет отрицательное значение, то транзистор с большим током больше нагревается, падение напряжения на нем уменьшается, что приводит к еще большей нагрузке по току и дальнейшему нагреву. В IGBT транзисторах знак ТКНН зависит от тока. Например, для транзисторов типа GA100TS60SQ при небольших токах ТКНН отрицательный, а при больших — положительный [15]. Существует несколько факторов, способствующих выравниванию токов между параллельно соединенными транзисторами [16]. Первый фактор — транзисторы должны иметь одинаковую температуру, что достигается установкой их на одном радиаторе. В этом случае температуры кристаллов отличаются незначительно, что способствует снижению дисбаланса токов. Повышение общего тока (второй фактор) вызывает увеличение падения напряжения на всех транзисторах, что способствует еще более равномерному распределению [15]. Третий фактор — соединение предварительно подобранных транзисторов с одинаковыми падениями напряжения. Этим достигается разница в токах меньше 5 % [17, 18]. Если не подбирать транзисторы, то с увеличением их количества возрастает неравномерность распределения токов, которая в конце концов приведет к выходу из строя одного из них. В источниках питания соединяют параллельно также диоды выпрямителя сварочного тока.

Для уменьшения токов дисбаланса следует использовать диоды с одинаковым падением напряжения [18].

Кроме неравномерного распределения токов, в статике существует неравномерное распределение токов в динамике. Это вызвано разными временами включения и выключения транзисторов и пороговыми напряжениями отпирания. Подбор транзисторов по одинаковым динамическим характеристикам практически не применяется. Поэтому для уменьшения дисбаланса токов в динамике целесообразно в цепь управления каждого транзистора включать сопротивление [18]. Неравномерность распределения токов при переключении транзисторов вызывается индуктивностями соединительных проводников [19]. Применение IGBT модулей снимает с разработчика задачу уменьшения неравномерного распределения токов между дискретными транзисторами и диодами [20].

Управление выходным напряжением источника питания возможно несколькими способами. Первый — изменение напряжения питания инвертора, например, с помощью чоппера. Второй способ — использование регулируемого сварочного выпрямителя выходного напряжения. Третий, наиболее часто используемый способ, регулирование инвертора [21]. Регулирование возможно широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), ШИМ с регулируемым фазовым сдвигом (ШИМ-ФС), изменением частоты (ЧИМ) или комбинациями способов. Наиболее простой и часто используемый способ — это ШИМ. В мостовом инверторе при ШИМ транзисторы плеча коммутируются одновременно. Если транзисторы плеча коммутировать с временным сдвигом (ШИМ-ФС), то можно снизить динамические потери и помехи. При ЧИМ возможно изменение длительности импульса при постоянной длительности паузы или ее изменении при постоянной длительности импульса. Частотный способ чаще всего применяется в бюджетных и самодельных источниках [6, 11].

На надежность источника и энергетическую эффективность большое влияние оказывают процессы переключения транзисторов. В моменты переключения в кристалле транзистора выделяется большая мощность, вызывающая ускоренное старение кристаллов. Применение цепочек из конденсаторов, диодов и резисторов (снабберы) позволяет в моменты переключения перевести ток транзистора на конденсатор [21, 22]. В перерывах между коммутациями энергия, запасенная в конденсаторе, рассеивается в сопротивлении, увеличивая температуру внутри источника. При небольших паузах между коммутациями конденсатор не успевает разрядиться, эффективность снаббера снижается. Более сложные цепочки с дополнительной индуктивностью обеспечивают возврат энергии [4, 5, 21]. Эффективно действующие снаб-



беры достаточно громоздки. Наиболее простым способом улучшения условий переключения транзисторов и повышения безопасности их работы является отключение напряжения питания от инвертора в моменты коммутации дополнительным транзистором. Современные IGBT транзисторы могут кратковременно пропускать максимально допустимый ток при максимально допустимом падении напряжения на них. Поэтому во многих источниках не используются специальные устройства для формирования траектории переключения транзисторов. Часто обходятся применением одного высокочастотного конденсатора по питанию инвертора, расположенного максимально близко к транзисторам.

Напряжение на транзисторе, даже кратковременно, не должно превышать максимально допустимого значения. Коммутационные перенапряжения, вызванные индуктивностью проводов, могут достигать сотен вольт. Уменьшение перенапряжений достигается снижением площади контура протекания тока внутри инвертора [20, 21, 23]. Ограничение коммутационных перенапряжений осуществляется также конструированием контуров с минимальной площадью. Применение транзисторно-диодных модулей уменьшает перенапряжения.

Еще одним способом снижения динамических потерь и перенапряжений является применение резонансных инверторов, в которых переключение транзисторов происходит при нулевом токе или напряжении [5, 6, 21, 24–27]. Чаще всего первичная обмотка высокочастотного трансформатора включается последовательно с конденсатором C и индуктивностью L . В этом случае переключение транзисторов происходит при нулевом токе. Конденсатор также устраняет постоянную составляющую тока намагничивания. Схемы с параллельным включением C , L и первичной обмотки применяют реже. Инвертор должен обеспечивать широкий диапазон регулирования напряжения и тока при изменении нагрузки в диапазоне от короткого замыкания до холостого хода. В таких условиях тяжело обеспечить коммутацию транзисторов без тока во всех режимах. Поэтому в некоторых случаях динамические потери резонансного инвертора могут превышать потери в обычных инверторах. Наиболее часто резонансные инверторы применяют в источниках с питанием от сети 220 В. Ток регулируется частотным методом. Переключение транзисторов при нулевом токе происходит при максимальном сварочном токе и минимальной частоте. При возрастании частоты импеданс контура возрастает, сварочный ток уменьшается. Напряжение на конденсаторе во время резонанса может достигать нескольких киловольт [6, 11]. Исследование и проектирование резонансного инвертора аналитическими методами — сложная

задача, более удобно моделировать его с помощью пакетов MatLab, MicroCap и др. [26].

Ток, потребляемый из сети сварочным инвертором, имеет импульсную составляющую, обусловленную зарядом входного конденсатора. Особенно существенны импульсные токи при питании от однофазной сети. Это увеличивает среднеквадратичное значение потребляемого тока и искажает напряжение сети. Применение корректоров коэффициента мощности (ККМ) уменьшает среднеквадратичный ток, позволяет увеличить сварочный ток при той же нагрузке на сеть. Это особенно актуально для источников питания, подключенных к маломощной сети [4]. Достаточно простой и эффективно работающий ККМ можно построить на схеме преобразователя с повышением напряжения (рис. 6). Выходное напряжение ККМ равно 400 В, что позволяет применить коэффициент трансформации 5/1 и уменьшить ток транзисторов. Такую же схему можно применить при питании от трехфазной сети. Дальнейшее уменьшение искажений сети требует более сложных алгоритмов управления и схем [4, 28]. Корректоры мощности усложняют в целом источник питания и повышают стоимость. Поэтому, несмотря на преимущества, они применяются редко.

Для хорошего зажигания дуги и предотвращения ее обрывов напряжение холостого хода источника должно быть 60...80 В. Напряжение на дуге на токе 200 А не превышает 24 В. Если применять коэффициент трансформации трансформатора, обеспечивающий плавное регулирование напряжения в диапазоне от 0 до 80 В, то транзисторы в рабочем режиме будут пропускать увеличенный ток короткими импульсами. Это повышает потери энергии и вынуждает использовать транзисторы с большим допустимым током. Поэтому выгодно применять трансформаторы, максимальное вторичное напряжение которых равно номинальному напряжению дуги, а для повышения напряжения холостого хода применять дополнительный, маломощный источник питания с крутопадающей характеристикой. Для того чтобы не использовать отдельный инвертор, повышенное напряжение для маломощного выпрямителя можно получить от дополнительной обмотки основного трансформатора. Другим способом явля-

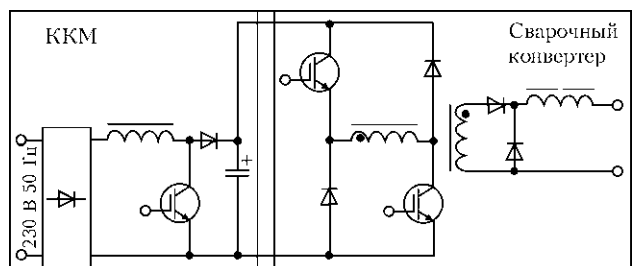


Рис. 6. Схема источника питания с ККМ



ется применение умножителя вторичного напряжения [6]. Дежурный ток в дуге будет поддерживаться все время, что снижает требования к индуктивности сглаживающего дросселя.

Транзисторы и диоды выходят из строя даже при кратковременном превышении напряжения выше предельных значений. Поэтому крайне важно обеспечить быстродействующую защиту от перенапряжений. Перенапряжения возникают во время коммутационных процессов в самом инверторе, при обрывах дуги или могут приходиться из питающей сети. Перенапряжения сглаживаются с помощью демпфирующих цепочек, максимальное значение ограничивается стабилиторами [21]. Наиболее часто стабилиторами защищается затвор транзистора, так как из-за емкости между затвором и коллектором напряжение при коммутации может неконтролируемо возрасти. Стабилиторы увеличивают емкость цепи управления, что может вызвать высокочастотную генерацию. Существенно реже стабилиторы защищают выводы коллектор–эмиттер, хотя это повышает надежность. Достаточно часто RC цепочками и стабилиторами защищают диоды выпрямителя сварочного тока [4, 6, 12]. При подключении напряжения сети происходит заряд конденсаторов питания инвертора. Для предотвращения кратковременного увеличения тока, который может вывестись из строя диоды входного выпрямителя, последовательно включается резистор, который после заряда конденсаторов шунтируется контактами реле. Такая схема применяется практически во всех однофазных источниках питания.

Кроме перенапряжений, для транзистора опасно превышение тока, температуры, работа в активном режиме, высокочастотные генерации. Целесообразно возложить часть защиты от таких опасных воздействий на драйверы, которые могут быть выполнены в виде одной микросхемы или в гибридном исполнении. Последний тип отличается большими функциональными возможностями [29]. В одном корпусе микросхемы могут содержаться драйверы для управления верхним и нижним плечами инвертора. Для упрощения драйвер верхнего плеча питается от конденсатора, заряжаемого от источника питания нижнего драйвера при замкнутом нижнем транзисторе. Драйверы в гибридном исполнении часто имеют встроенный источник питания схемы верхнего плеча. Драйверы обеспечивают задержку между включениями транзисторов верхнего и нижнего плеча, устраняя сквозные токи. Для предотвращения работы транзисторов в активной области контролируется напряжение на транзисторе в открытом состоянии [30]. В драйвер может быть встроена защита от превышения током допустимого значения. В качестве датчика тока может быть использован шунт, включенный в цепь эмит-

тера нижнего транзистора или дополнительный вывод транзистора. Более совершенные драйверы различают мягкое и жесткое короткое замыкание. Мягкое замыкание происходит в нагрузке, соединенной с инвертором кабелем, имеющим индуктивность. Жесткое происходит внутри инвертора и намного опаснее. Драйверы определяют тип замыкания, изменяя при этом алгоритм отключения. Наиболее функционально полными являются драйверы с использованием цифровой технологии, обеспечивающие адаптацию под конкретные условия применения [31].

Инверторные источники питания дают возможность управлять плавлением и переносом электродного металла. Фирма «Lincoln Electric» разработала способ переноса металла при сварке в CO_2 силами поверхностного натяжения (Surface Tension Transfer). Основными его преимуществами являются уменьшение разбрызгивания, стабильность процесса сварки, меньшее количество дыма. В России похожее управление применяет «ТехноТрон» при сварке корневых швов трубопроводов [32]. Исследование переноса металла силами поверхностного натяжения проводилось ранее в Институте электросварки им. Е.О. Патона и Институте электродинамики НАН Украины [2, 3, 33].

Фирма «Fronius» разработала способ управления переносом металла с торговой маркой CMT (Cold Metal Transfer). Во время короткого замыкания проволока оттягивается назад, протекание тока прекращается, капля переходит в ванну без брызг. Уменьшается нагрев изделия и выделение вредных веществ. Подобные работы по ускорению перехода металла с помощью пульсирующей подачи проволоки проводили в Институте электросварки им. Е. О. Патона в 1970-е годы [34]. В CMT Advanced полярность напряжения на электроде изменяется во время короткого замыкания. Отрицательная полярность увеличивает скорость плавления электрода. На положительной полярности обеспечивается контролируемый прецизионный перенос металла. Соотношения между положительными и отрицательными полярностями определяются индивидуально [35].

Фирма «Lorch» объединила несколько алгоритмов управления под общей торговой маркой Speed — «Мастер скорости» [36]. По сравнению с обычной импульсно-дуговой сваркой SpeedPulse уменьшает диаметр капели и увеличивает их количество. Перенос металла становится похожим на струйный. Увеличивается провар и производительность на 48 %. Технология SpeedArc предназначена для сварки металла толщиной до 15 мм в узкую разделку за один проход. Увеличенный вылет электрода способствует предварительному нагреву проволоки и повышению скорости плавления на 30 %. Подобные исследования систем автоматического управления при сварке с увели-



ченным вылетом были начаты в 1970-е годы [37, 38]. Для полуавтоматической сварки вертикальных швов применяют технологию SpeedUp. В горячей фазе горения дуги увеличенный ток расплавляет материал. В холодной стадии небольшой ток обеспечивает точное заполнение шва. Похожий способ приведен в работе [39]. Там же исследованы траектории движения держателя при полуавтоматической сварке вертикальных швов и предложены алгоритмы управления скоростью подачи, позволяющие еще больше снизить разбрызгивание и увеличить производительность. Технология SpeedRoot предназначена для сварки корня шва с зазором шириной до 8 мм методами MIG–MAG. Создаются управляемые колебания сварочной ванны в направлении электрода. Перенос капли в ванну происходит при коротком замыкании без тока в момент движения ванны от электрода, что уменьшает температуру металла.

Фирма «Kemppi» свои алгоритмы управления представляет под торговой маркой Wise. Полуавтоматическая и автоматическая сварка корня шва с зазором выполняется технологией WiseRoot с поперечными колебаниями электрода. Система управления контролирует объем ванны и периодически отключает подачу проволоки, давая время металлу остыть. Технология WiseThin позволяет сваривать металл толщиной до 0,6 мм.

В работе [40] показано, что колебания руки сварщика могут накладываться на скорость движения проволоки к поверхности изделия, увеличивая потери металла и ухудшая формирование шва. Стабилизировав реальную скорость подачи проволоки в дугу, можно снизить разбрызгивание. Особенно заметный эффект регулирования скорости подачи проволоки можно получить при сварке вертикальных швов. Такой способ управления пока не используется в серийном оборудовании.

Развитие систем автоматического управления сдерживается отсутствием углубленной информации о сварочном процессе. Как и много лет назад, основными сигналами обратных связей остались сварочный ток и напряжение. Напряжение на дуге удобно измерять в корпусе источника питания. Реально в этот сигнал входят падения напряжения на индуктивностях кабелей, подводящих ток от источника к дуге, падение напряжения в месте контакта проволоки с наконечником. При коротком замыкании в последней стадии разрушения перемычки падение напряжения не превышает нескольких вольт и его быстрые изменения заполняются помехами, имеющими близкий частотный спектр. Для эффективного управления сваркой необходимо знать мгновенные размеры капли и ванны, их температуру, состав выделяемого газа. Эту информацию можно было бы получить видеодатчиками. Высокая температура ду-

ги, разбрызгивание, портативность горелки и сложность системы управления препятствует их применению. Для системы управления необходимо знать скорость движения проволоки к дуге. Скорость подачи проволоки часто измеряют по ЭДС якоря двигателя. Погрешность такого измерения — десятки процентов. Реальная скорость движения проволоки в зону горения дуги еще больше отличается из-за упругих деформаций проволоки в шланге, периодических остановок в результате приваривания электрода к токоподводящему наконечнику, колебаний руки сварщика. Не зная главных параметров сварки, невозможно сделать хорошую систему управления.

В структурной схеме системы управления динамические характеристики инвертора можно представить звеном с чистым запаздыванием $T/2$, равным половине периода выходного напряжения. Микропроцессорную систему управления также можно представить звеном с чистым запаздыванием, значение которого зависит от алгоритма управления и быстродействия микропроцессора. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения используют дроссель в сварочной цепи. Для хорошего сглаживания пульсаций тока постоянная времени сварочной цепи должна существенно превышать T . В системе управления используют обратные связи по току и напряжению, сигналы которых также должны фильтроваться с постоянными времени, намного превышающими T . Поэтому суммарное время звеньев с чистым запаздыванием и постоянных времени структурной схемы составляет единицы миллисекунд. Окончательная стадия разрыва перемычки между электродом и ванной проходит за единицы микросекунд [2, 33]. Хаотические движения капли на торце электрода при сварке в активных газах находятся в килогерцовом диапазоне частот. Поэтому современные источники не в состоянии реагировать на многие быстротекающие процессы в дуге.

Развитие транзисторных источников питания началось в 1950-е годы с появлением кристаллических триодов. В советский период было выполнено много разработок, опережавших свое время. Сейчас они внедряются в производство ведущими фирмами под различными торговыми марками. По мере развития элементной базы возможности источников питания будут расширяться. Перспективными направлениями улучшения являются увеличение надежности параллельного соединения транзисторов, расширение диапазонов мягкой коммутации транзисторов, надежная защита от всех, даже редко встречающихся аварийных случаев. Для обратных связей будут использоваться размеры капли и ванны, их температура, состав выхлопных газов дуги. Появятся алгоритмы управления для работы в мик-



росекундном диапазоне. Скорость подачи проволоки будет регулироваться в соответствии с колебаниями руки сварщика.

1. *Регулирование режимов механизированной сварки в CO₂ при использовании многопостовых источников тока* / Ю. И. Драбович, А. В. Лебедев, В. В. Кравченко и др. // Автомат. сварка. — 1987. — № 10. — С. 70–71.
2. *Лебедев А. В.* Исследование управляемого переноса металла при сварке в CO₂ // Там же. — 1991. — № 3. — С. 33–38.
3. *Транзисторный источник питания для дуговой сварки* / А. В. Лебедев, Н. П. Гриценко, И. В. Довбищенко и др. // Там же. — 1994. — № 9/10. — С. 50–51.
4. *Перспективная схемотехника сварочных инверторов.* <http://radiohobby.org/modules/news/article.php>
5. *Петров С.* Перспективная схемотехника сварочных инверторов // Совр. электроника. — 2009. — № 1. — С. 36–45.
6. *Негуляев В. Ю.* Сварочный инвертор — это просто. — Киев, 2005. — 42 с.
7. *Конев Ю. И.* Параллельное включение кристаллических триодов // Полупроводниковые приборы и их применение. — 1957. — Вып. 1. — С. 41–52.
8. *Проектирование мощных высоконадежных статических преобразователей* / А. С. Абрамов, В. Г. Вигдорчик, Г. М. Веденеев, Ю. И. Драбович // Устройства преобразования техники. — 1969. — Вып. 3. — С. 82–93.
9. *Лебедев А. В.* Выпрямление прямоугольного напряжения // Пробл. техн. электродинамики. — 1976. — № 57. — С. 66–69.
10. *Назаров В. И., Рыженко В. И.* Сварочный инвертор. — Рыбинск: Оникс, 2008. — 40 с.
11. *Володин В. Я.* Современные сварочные аппараты своими руками. — С.-Пб.: Наука и техника, 2008. — 304 с.
12. *Борисов Д. А.* Электрическая схема сварочного инвертора. <http://nanolife.info/svarochnoe-oborudovanie/>
13. *Петров С.* Схемотехника промышленных сварочных инверторов // Совр. электроника. — 2007. — № 8. — С. 42–47.
14. *Parallel operation of dynex IGBT modules.* Application Note. AN5505-1.3 DYNEX SEMICONDUCTOR LTD. July 2002.
15. *Roccaro, R. Filippo, M. Salato.* AC TIG Welding: Output inverter design basics. APPLICATION NOTE. AN-1045. Intern. Rectifier. — 2/10/2003.
16. *International Rectifier.* IR AN-990 «Application characterization of IGBTs».
17. *Драбович Ю. И., Пономарев И. Г.* Исследование процессов в мостовой схеме инвертора при отказах транзисторов // Пробл. техн. электродинамики. — 1974. — № 45. — С. 56–62.
18. *Колтаков А.* Особенности параллельного соединения модулей IGBT // Компоненты и технологии. — 2005. — № 5. — С. 31–37.
19. *Колтаков А.* Подключение сигнальных цепей в мощных преобразовательных устройствах // Новости электроники. — 2008. — № 15. — С. 25–29.
20. *Симкин Я., Колтаков А.* Особенности применения силовых IGBT модулей фирмы Semikron // Электронные компоненты. — 2002. — № 6. — С. 18–16.
21. *Lebedev A. V.* Transistorized power sources for arc welding. — Harwood Acad. publ., 1998. — 180 p.
22. *Мелешин В. И.* Транзисторная преобразовательная техника. — М.: Техносфера, 2005. — 632 с.
23. *Лебедев А. В., Кравченко В. В.* Уменьшение коммутационных перенапряжений в импульсных преобразователях. М., 1986. — Деп. в ВИНТИ, 1986, №18734.
24. *Dudrik J., Dzurko P.* Arc welder with series-parallel resonant DC-DC converter. // Acta Technica CSAV.— 2006.— 51. — P. 415–426.
25. *Петров С.* Перспективы применения резонансных преобразователей в качестве источников сварочного тока // Совр. схемотехника. — 2006. — № 7. — С. 16–23.
26. *Фельдшер И. Ф.* Компьютерное моделирование квазирезонансного инверторного источника питания для дуговой нагрузки // Математичні машини і системи. — 2007. — № 1. — С. 117–121.
27. *Horvath M., Borka J.* Up-to-date, integrated, multifunctional energy converters of welding technologies // Proc. of EPE-PEMC conf. 2006, Portoroz, Slovenia. — 2006. — Vol. 2–11. — P. 70–75.
28. *Leejn, Kim JH., Kim S.S., Won CY., Kim Y.S., Choi S.* Harmonic reduction of CO₂ welding machine using single-switch, three-phase boost converter with six order harmonic injection PWM. IEEE ISJET01 Proc. — 2001. — 3. — P. 1526–1529.
29. *Крант Й.* Защитные функции современных драйверов IGBT // Силовая электроника. — 2010. — № 5. — С. 40–48.
30. *Никитин А.* Современные высоковольтные драйверы MOSFET- и IGBT-транзисторов // Новости электроники. — 2006. — № 6. — С. 23–31.
31. *Геммер Р., Квиз П., Венд М.* IGBT-драйверы с программно-управляемыми характеристиками // Силовая электроника. — 2010. — № 5. — С. 38–39.
32. *Создание многофункционального инверторного источника для сварки с управляемым переносом электродного металла* / О. Б. Гецкин и др. // Тяж. машиностроение. — 2009. — № 2. — С. 16–20.
33. *Патон Б. Е., Лебедев А. В.* Управление плавлением и переносом электродного металла при сварке в углекислом газе // Автомат. сварка. — 1988. — № 11. — С. 1–5.
34. *Управление процессом сварки программированием подачи проволоки* / Б. Е. Патон, Н. М. Воропай, В. Н. Бучинский и др. // Там же. — 1977. — № 1. — С. 1–5.
35. *Еще больше возможностей с CMT Advanced* // Weld+Vision. — 2009. — № 23.
36. *Принцип Качество.* Промышленная программа компании «Lorch». — Lorch Schweisstechnik GmbH, 2011.
37. *Лебедев А. В.* Структурная схема процесса саморегулирования дуги при переносе металла с короткими замыканиями // Автомат. сварка. — 1978. — № 5. — С. 7–12.
38. *Лебедев А. В.* Влияние тепловыделения в вылете электрода на процесс саморегулирования дуги // Там же. — 1978. — № 7. — С. 10–16.
39. *Лебедев А. В.* Управление скоростью подачи проволоки при механизированной сварке вертикальных швов // Там же. — 1986. — № 3. — С. 34–39.
40. *Лебедев А. В., Супрун С. А.* Эффективность стабилизации сварочного тока при полуавтоматической сварке // Там же. — 1978. — № 10. — С. 37–42.

The paper describes the most widely accepted schematics of electric arc transistor power sources. Features of parallel operation of transistors, methods of overvoltage protection and switching path formation, modern drivers, designs of high-frequency transformers, power correctors, systems of control of electrode metal melting and transfer are considered.

Поступила в редакцию 24.04.2012