

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СВАРОЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Н. М. МАХЛИН

ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины». 03680, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

Рассмотрены вопросы повышения устойчивости сварочной дуги переменного тока при дуговой и плазменной сварке путем совершенствования сварочных источников питания. Отмечено, что из известных способов наибольшее распространение получили импульсное увеличение выходного напряжения источника питания при смене полярности тока дуги, применение индуктивно емкостных преобразователей, использование источников питания, обеспечивающих близкую к прямоугольной форму тока дуги. Показано, что наиболее эффективным является создание сварочных источников питания переменного тока, сочетающих два или несколько таких методов и имеющих в своем составе цепи или устройства, обеспечивающие возможность функционировать как в режиме первоначального возбуждения (зажигания) дуги, так и в режиме стабилизации процесса ее горения. Это достижимо, в частности, путем выполнения этих цепей или устройств в виде генераторов импульсов высокого или повышенного напряжения с двумя независимыми формирующими контурами. Приведены и описаны несколько вариантов схемотехнических решений усовершенствованных источников питания для дуговой сварки переменным током. Библиогр. 37, рис. 7.

Ключевые слова: дуговая и плазменная сварка, переменный ток, источники питания, первоначальное и повторные возбуждения дуги, фазовое регулирование, устойчивость дуги, электромагнитная совместимость, индуктивно-емкостные преобразователи

Дуговая и плазменная сварка переменным током по сравнению со сваркой постоянным током обладает рядом таких технологических преимуществ, как отсутствие магнитного дутья, возможность формирования шва с благоприятными геометрическими параметрами и профилем проплавления, а также получение более мелкозернистой структуры металла шва и зоны термического влияния, в том числе и на более производительных режимах, чем при сварке постоянным током. Сварка переменным током значительно экономичнее сварки постоянным током — сварочные источники питания переменного тока отличаются простотой построения и конструкции и в большинстве случаев их КПД и показатели надежности выше, чем у источников питания постоянного тока, а расходы на их эксплуатацию и обслуживание ощутимо ниже [1–6]. В силу этого переменный ток широко используется во многих отраслях промышленности для осуществления ручной дуговой сварки покрытыми электродами (ММАW), сварки под флюсом (SAW), ручной и механизированной сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (TIG-AC) и других способов дуговой и плазменной сварки.

Наряду с известными преимуществами сварки переменным током присущи и определенные недостатки, основной из которых заключается в низкой устойчивости процесса горения дуги, что

особо характерно для синусоидальных сварочных токов промышленных частот и связано с ее периодическими погасаниями вследствие деионизации межэлектродного промежутка, возникающей при каждом изменении полярности тока дуги, т. е. вблизи его нулевых значений. Поэтому на протяжении многих десятилетий и до настоящего времени учеными и специалистами сварочного производства ведется поиск способов и средств повышения устойчивости сварочных дуг переменного тока [1, 2, 4, 5, 7–26], среди которых важное место занимает проблематика совершенствования сварочных источников питания.

Целью настоящей работы является рассмотрение и описание отдельных разработок, преимущественно выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, направленных на повышение устойчивости дуги переменного тока путем совершенствования построения и алгоритмов работы силовой части сварочных источников питания.

Особенности и примеры построения усовершенствованных сварочных источников питания переменного тока. Вопросы повышения устойчивости дуги при смене полярности сварочного тока путем совершенствования сварочных источников питания отражены в многочисленных монографиях, статьях и патентах. В этом направлении выполнены достаточно глубокие теоретические исследования, проведены обширные экспериментальные работы, разработаны и опробованы

различные способы совершенствования источников питания и технические решения, обеспечивающие реализацию этих способов [1–5, 7–21].

Проведенными исследованиями установлено, что одним из обязательных условий обеспечения повторных возбуждений дуги при смене полярности ее тока является выполнение требования $U_2 > U_3$, где U_2 — напряжение, прикладываемое к промежутку между сварочным электродом и свариваемым изделием в интервалы времени, соответствующие переходам тока дуги через нулевые значения; U_3 — значение амплитуды напряжения зажигания дуги в каждом полупериоде сварочного тока, называемом пиком зажигания [1, 2, 4, 5, 15]. Необходимо отметить, что выполнение этого требования путем повышения напряжения холостого хода $U_{x.x}$ источника питания затруднено условиями безопасности, согласно которым эффективное значение $U_{x.x}$ источников питания для дуговой сварки не должно превышать 80 В, а амплитудное значение 113 В. Также установлено, что длительность бестоковой паузы при смене полярности тока дуги определяется составом газа в межэлектродном промежутке и потенциалом его ионизации, а также скоростью изменения тока дуги dI_A/dt , которая для обеспечения устойчивого горения дуги должна быть более 10 кА/с. Чем больше dI_A/dt , тем короче длительность бестоковой паузы, больше время деионизации и ниже значение U_3 [1, 4, 5, 8]. С достаточной для практики точностью значение dI_A/dt может быть определено как

$$dI_A/dt \approx \Delta I_A/dt = I_{A0}\omega,$$

где I_{A0} — амплитудное значение тока дуги; ω — его угловая частота.

Из известных способов повышения устойчивости дуги переменного тока наиболее широкое распространение получили следующие:

- импульсное увеличение выходного напряжения источника питания при смене полярности тока дуги, в том числе с помощью применения специальных вольтодобавочных устройств импульсного действия — стабилизаторов горения дуги;
- применение индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП);
- использование источников питания, обеспечивающих форму тока дуги, близкую к прямоугольной;
- сочетание нескольких отмеченных способов.

Импульсное увеличение выходного напряжения источника питания при смене полярности тока дуги применяют, в частности, для совершенствования источников питания, построенных на основе однофазных сварочных трансформаторов с механическим или электрическим регулированием и предназначенных для использования на промышленной частоте 50 (60) Гц преимуще-

ственно при MMAW. Хотя производство и потребление таких источников питания постепенно сокращается, парк находящихся в эксплуатации сварочных трансформаторов весьма значителен и только в странах СНГ составляет многие сотни тысяч штук, поэтому задача расширения их технологических возможностей продолжает оставаться актуальной [27]. Все существующие технические решения по реализации способа импульсного увеличения выходного напряжения сварочных трансформаторов предполагают введение дополнительных блоков или цепей, обеспечивающих формирование импульсов напряжения, суммируемого при смене полярности тока дуги с напряжением вторичной обмотки сварочного трансформатора. При этом в состав этих дополнительных блоков или цепей обязательно входит или вспомогательный трансформатор ограниченной мощности, или дополнительная обмотка на магнитопроводе сварочного трансформатора [1, 2, 4, 5, 9, 15]. В результате импульсного возрастания выходного напряжения U_2 источника питания до значения $U_2 > U_3$ при смене полярности тока дуги обеспечиваются повторные возбуждения дуги. К недостаткам известных устройств, с помощью которых реализуется способ импульсного увеличения выходного напряжения источника питания, следует отнести необходимость некоторого усложнения и удорожания конструкции таких источников питания, отсутствие возможности осуществления бесконтактного первоначального возбуждения дуги, зависимость значений выходного напряжения источника питания от колебаний напряжения питающей сети. На рис. 1 приведена структурно-функциональная схема одного из вариантов построения усовершенствованного источника питания с импульсным увеличением выходного напряжения [28].

Источник питания для сварки переменным током содержит регулируемый (преимущественно механически или электромеханически) однофазный сварочный трансформатор $TV1$ с силовыми первичной I и вторичной II обмотками и дополнительной обмоткой III, а также возбудитель-стабилизатор.

В его состав входят биполярный источник постоянного тока I, блок управления (БУ) 2, цепь импульсной стабилизации, включающая конденсатор C1, обмотку III сварочного трансформатора $TV1$ и ключ на тиристорах $VS1$ и $VS3$, а также цепь генерации высоковольтных импульсов, образуемая конденсатором C2, первичной обмоткой I повышающего импульсного трансформатора $TV2$, вторичная обмотка II которого включена в сварочную цепь последовательно, и ключом на тиристорах $VS2$ и $VS4$. Конденсатор C3 предназначен для

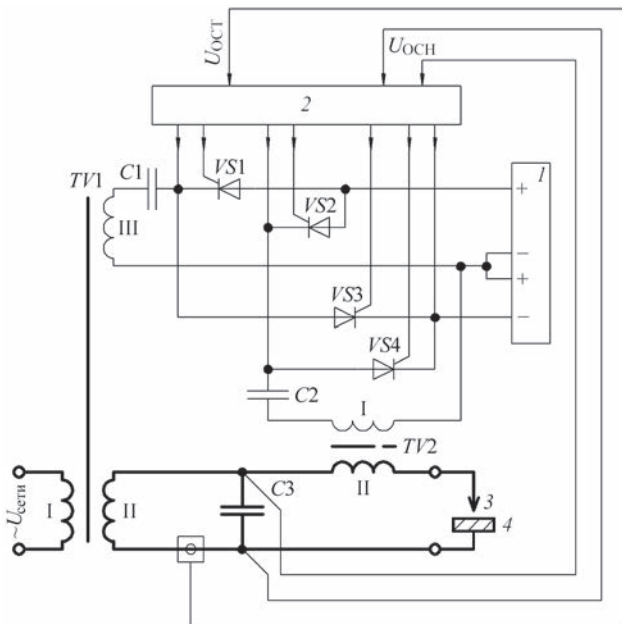


Рис. 1. Структурно-функциональная схема усовершенствованного источника питания переменного тока на базе сварочного трансформатора с амплитудным механическим или электромеханическим регулированием (обозначения см. в тексте)

обеспечения защиты сварочного трансформатора $TV1$ от воздействия высоковольтных импульсов.

При первоначальном возбуждении дуги в положительную или отрицательную полуволну напряжения питания сварочного трансформатора $TV1$ сигналами с БУ 2 в моменты, близкие к достижению напряжением холостого хода $U_{x.x\ tr}$ трансформатора $TV1$ амплитудного значения, включится тиристор $VS2$ или $VS4$ соответственно, что обусловит колебательный заряд или перезаряд конденсатора $C2$ через обмотку I повышающего импульсного трансформатора $TV2$. По завершению заряда или перезаряда конденсатора $C2$ тиристор $VS2$ или $VS4$ автоматически выключается. Вследствие заряда или перезаряда конденсатора $C2$ на обмотке II трансформатора $TV2$ формируется импульс высокого напряжения, инжектируемый через защитный конденсатор $C3$ в промежуток между электродом 3 и свариваемым изделием 4, что вызывает ударную ионизацию этого межэлектродного промежутка, его электрической пробой и возникновение в нем искрового разряда, переходящего в дуговой, при котором через межэлектродный промежуток начнет протекать ток дуги от обмотки II сварочного трансформатора $TV1$. При возникновении в межэлектродном промежутке устойчивого дугового разряда по сигналу обратной связи по току дуги (U_{ocst}) подача с БУ 2 сигналов включения тиристора $VS2$ или $VS4$ прекратится. Одновременно с этим в моменты, определяемые сигналами обратной связи по напряжению дуги (U_{och}) и близкие к моментам смены полярности напряжения дуги, с БУ 1 начнут

поступать сигналы включения тиристора $VS1$ или $VS3$. С включением тиристора $VS1$ или $VS3$ будет происходить заряд или перезаряд конденсатора $C1$ через обмотку III сварочного трансформатора $TV1$. Вследствие этого на его обмотке II сформируется импульс повышенного напряжения, инжектируемый в межэлектродный промежуток и стабилизирующий процесс горения дуги. По завершению заряда или перезаряда конденсатора $C1$ тиристор $VS1$ или $VS3$ автоматически выключится.

К преимуществам этого устройства можно отнести экономичность и сравнительную простоту электросхемы и конструкции, амплитудное регулирование сварочного тока и неизменность коэффициента его формы во всем диапазоне регулирования, возможность использования сварочных трансформаторов с пониженным напряжением холостого хода. Недостатками устройства являются невозможность программирования (задания) параметров цикла сварки и осуществления режимов сварки модулированным током, потери некоторой части мощности стабилизирующих импульсов из-за шунтирующего действия защитного конденсатора $C3$, необходимость специального выполнения сварочного трансформатора $TV1$ и определенного усложнения БУ 2, обусловленного требованием раздельного управления тиристорами $VS1 \dots VS4$, отсутствие возможности исполнения возбудителя-стабилизатора в виде автономного устройства. Тем не менее, описанное устройство нашло применение в универсальных установках для MMAW и TIG-AC, например, в однофазных сварочных аппаратах И-205 УЗ.1 и в других источниках питания для дуговой сварки переменным током, построенных на основе сварочных трансформаторов с механическим или электромеханическим регулированием сварочного тока.

По сравнению с источниками питания переменного тока, выполненными на базе сварочных трансформаторов с механическим или электромеханическим регулированием тока дуги, лучшими массогабаритными показателями и более широкими технологическими возможностями обладают источники питания, построенные с использованием сварочных трансформаторов с электрическим регулированием. Это так называемые тиристорные трансформаторы (ТТ), в основу принципа действия которых положен способ фазового регулирования тока дуги [2, 4, 5, 29]. Фазорегулятор ТТ, как правило, состоит из двух встречно-параллельно соединенных тиристорных систем и системы их управления. Все известные ТТ могут быть классифицированы по двум основным признакам: способу обеспечения непрерывности тока дуги и месту расположения фазорегулятора — в первичной или вторичной цепи трансформатора. В свою очередь,

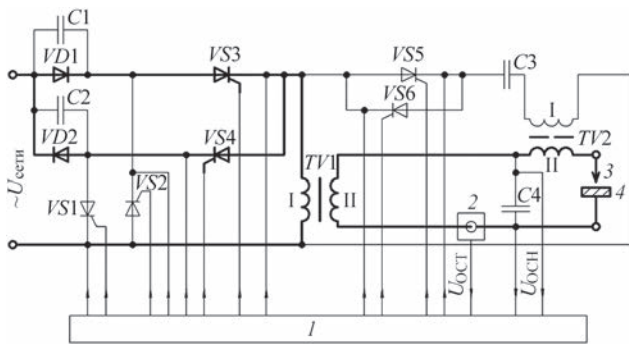


Рис. 2. Упрощенная электрическая принципиальная схема силовой части усовершенствованного источника питания, построенного на базе ТТ с фазорегулятором в первичной цепи по первому из этих признаков ТТ подразделяются на две группы. В первую входят трансформаторы с прерывистым током дуги, т. е. с наличием бестоковых пауз в каждом полупериоде этого тока; во вторую — ТТ, обеспечивающие непрерывность протекания тока через межэлектродный промежуток в течение всего процесса сварки (за исключением коротких интервалов времени при смене полярности тока дуги).

На рис. 2 приведена упрощенная электрическая принципиальная схема силовой части усовершенствованного источника питания. Схема построена согласно [30] на базе ТТ, содержащего в своей первичной цепи фазорегулятор на диодах $VD1$, $VD2$ и тиристорах $VS3$, $VS4$, компоненты вольтодобавочного узла (конденсаторы $C1$, $C2$ и тиристоры $VS1$, $VS2$) и подключенную параллельно первичной обмотке I сварочного трансформатора $TV1$ с развитым магнитным рассеянием цепь формирования высоковольтных импульсов (тиристоры $VS5$, $VS6$, конденсатор $C3$ и первичная обмотка I импульсного трансформатора $TV2$), 1 — блок управления, 2 — датчик тока дуги.

Бесконтактное первоначальное возбуждение дуги осуществляется с помощью импульсов высокого напряжения, инжектируемых в межэлектродный промежуток (промежуток между электродом 3 и свариваемым изделием 4) через защитный конденсатор $C4$. После инициирования в межэлектродном промежутке искрового разряда и перехода последнего в устойчивый дуговой разряд тиристоры $VS5$, $VS6$ выключаются и генерация высоковольтных импульсов прекращается, а процесс сварки поддерживается за счет знакопеременных импульсов тока дуги, следующих с частотой напряжения питающей сети. При этом повторные возбуждения дуги обеспечиваются тем, что в моменты включения тиристоров $VS3$ или $VS4$ к первичной обмотке I сварочного трансформатора $TV1$ прикладывается напряжение, равное сумме мгновенного значения напряжения питающей сети и значения установившегося напряжения на предварительно заряженных конден-

саторах $C1$ или $C2$ через тиристоры $VS2$ или $VS1$ соответственно. Это обуславливает импульсное увеличение напряжения на межэлектродном промежутке до значения, превышающего пик зажигания U_3 , в моменты начала каждого импульса тока дуги. Регулирование протекающего через межэлектродный промежуток тока осуществляется путем изменения угла включения тиристоров $VS3$ и $VS4$.

К преимуществам источников питания, построенных в соответствии с приведенной на рис. 2 схемой, можно отнести их способность обеспечивать как бесконтактное первоначальное возбуждение дуги, так и ее повторные возбуждения в процессе сварки, возможность снижения массогабаритных показателей источников питания за счет относительно небольших размеров устанавливаемого в первичной цепи фазорегулятора и использования сварочных трансформаторов с фиксированным расположением их первичной и вторичной обмоток и пониженным до 45...48 В напряжением холостого хода. Вместе с тем, помимо недостатков (включая характерно низкие показатели электромагнитной совместимости (ЭМС), которые принципиально присущи всем ТТ с прерывистым током дуги и фазорегулятором в первичной цепи [2, 4, 5], описаному источнику питания свойственны резко выраженная зависимость коэффициента формы сварочного тока от скважности его импульсов в каждом полупериоде и сравнительно узкий диапазон регулирования этого тока, а необходимость использования для построения такого источника питания несколько увеличенного количества тиристоров приводит к усложнению его системы управления. Исходя из этого, подобные источники питания наиболее рационально применять при SAW, ручной сварке покрытыми электродами больших диаметров (от 5 мм) и ограничено при TIG-AC на токах более чем 350 А.

Как показали исследования и опыт применения устройств с фазовым регулированием тока дуги, более широкие технологические возможности и более высокие показатели ЭМС имеют ТТ, в которых фазорегулятор размещен во вторичной цепи сварочного трансформатора, а непрерывность протекания через межэлектродный промежуток тока достигается с помощью специальной цепи, называемой цепью подпитки и обеспечивающей заполнение бестоковых пауз в интервалы непроводимости тиристоров фазорегулятора. Незначительно упрощенная электрическая принципиальная схема силовой части усовершенствованного источника питания этого типа приведена на рис. 3. Основными составными частями этого источника питания являются нерегулируемый

сварочный трансформатор $TV1$, фазорегулятор на тиристорах $VS1$ и $VS2$, блок управления I , датчик сварочного тока 2 и питаемый напряжением сети возбудитель-стабилизатор, содержащий накопительные конденсаторы $C1$ и $C2$, импульсный трансформатор $TV2$ с двумя отдельными первичными обмотками I и II и выходной вторичной обмоткой III, а также ключи с двухсторонней проводимостью на тиристорах $VS3...VS6$. Сварочный трансформатор $TV1$ выполнен с одной первичной обмоткой I и двумя последовательно и согласно соединенными вторичными обмотками II и III, при этом обмотка II имеет нормальное магнитное рассеяние, а обмотка III — повышенное. Регулирование сварочного тока, поддержание его заданного значения неизменным при воздействии внешних возмущений и формирование внешних вольтамперных характеристик (ВАХ) источника питания производятся с помощью фазорегулятора на тиристорах $VS1, VS2$ и обратных связей по току U_{OCT} и напряжению дуги U_{OCH} . Цепь подпитки (ток которой составляет от 10 до 15 А) образована вторичными обмотками сварочного трансформатора $TV1$, причем обмотка III подключена параллельно фазорегулятору на тиристорах $VS1, VS2$, вследствие чего ВАХ источника питания имеют вид, изображенный на рис. 4.

Особенность такого построения цепи подпитки заключается в том, что при переходах тока подпитки через нулевые значения напряжение, прикладываемое к межэлектродному промежутку, достигает значения $U_{x.x тр}$, равного сумме напряжений холостого хода на обмотках II и III сварочного трансформатора $TV1$ (см. рис. 3).

В режиме первоначального возбуждения дуги формирование высоковольтных импульсов в генераторе импульсов напряжения (ГИН) возбудителя-стабилизатора обеспечивается с помощью контура, содержащего ключ на тиристорах $VS3, VS4$, накопительный конденсатор $C1$ и обмотку I импульсного трансформатора $TV2$. При формировании импульсов повышенного напряжения в режиме стабилизации горения дуги используется контур, состоящий из ключа на тиристорах $VS5, VS6$, накопительного конденсатора $C2$ и обмотки II импульсного трансформатора $TV2$, с вторичной обмотки III которого и высоковольтные импульсы и импульсы повышенного напряжения в промежутке между сварочным электродом 3 и свариваемым изделием 4 инжектируются через защитный конденсатор $C3$. Переключение возбудителя-стабилизатора из режима первоначального возбуждения дуги в режим стабилизации горения дуги и наоборот осуществляется автоматически с помощью блока управления I за счет использования поступающих в него сигналов U_{OCT} и U_{OCH} по

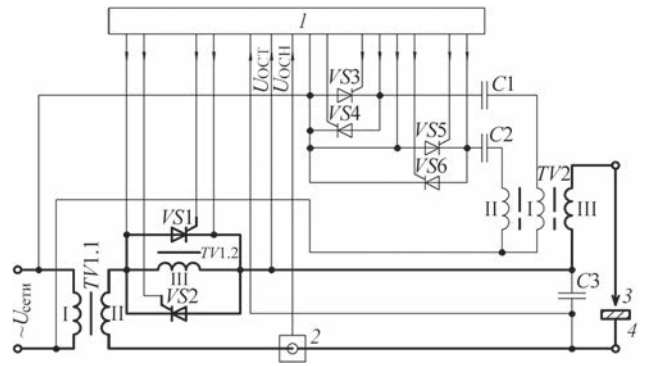


Рис. 3. Упрощенная электрическая принципиальная схема силовой части усовершенствованного источника питания, построенного на базе ТТ с фазорегулятором во вторичной цепи и цепью подпитки

тому же алгоритму, что и для возбудителя-стабилизатора источника питания, структурно-функциональная схема которого приведена на рис. 1.

По сравнению с ТТ, построенными согласно схемы, приведенной на рис. 2, преимуществами источников питания, схема которых соответствует рис. 3, являются возможность обеспечивать существенно более широкий диапазон регулирования сварочного тока (наименьшее значение которого может быть равно току подпитки), меньшие значения коэффициента формы сварочного тока и меньшее влияние этого коэффициента на стабильность процесса сварки и другие сварочные свойства источника питания, возможность использования для ТIG-AC (в том числе изделий из алюминия и его сплавов) начиная с диапазона «малых» сварочных токов.

Основной недостаток источников питания, схема которых приведена на рис. 3, обусловлен низкой скоростью изменения тока подпитки при смене его полярности, не превышающей 4 кА/с, что приводит к сокращению времени деионизации межэлектродного промежутка, а следовательно, к необходимости наращивания энергии и амплиту-

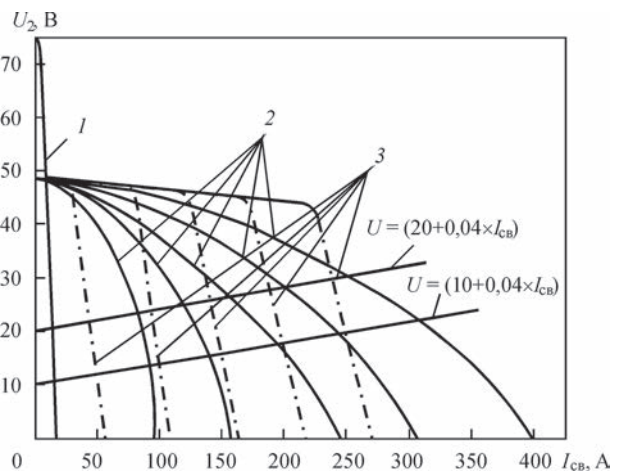


Рис. 4. Примеры ВАХ усовершенствованного источника питания, построенного на базе ТТ с фазорегулятором во вторичной цепи и цепью подпитки: 1 — цепи подпитки; 2 — в режиме MMAW; 3 — в режиме TIG-AC

ды генерируемых возбудителем-стабилизатором импульсов повышенного напряжения и экспериментального определения моментов начала генерации этих импульсов.

Другой существенный недостаток заключается в ограничениях глубины регулирования сварочного тока, увеличение которой неизбежно связано с ростом коэффициента его формы. Последнее неблагоприятно отражается на стойкости покрытия штучных и износостойкости неплавящихся электродов [2]. Однако, несмотря на отмеченные недостатки, описанное устройство нашло применение в универсальных установках для MMAW и TIG-AC, например, в однофазных сварочных установках И-190 УЗ.1 и в других источниках питания для дуговой сварки переменным током, построенных на основе ТТ с цепью подпитки и импульсной стабилизацией процесса горения дуги.

Помимо источников питания, схемы силовых блоков которых приведены на рис. 1–3, в сварочном производстве для осуществления MMAW, SAW и (ограниченно) TIG-AC нашли применение и источники питания переменного тока, содержащие регулируемый сварочный трансформатор и устройство импульсной стабилизации горения дуги (УСГД). Особенности, схемно-конструктивным решениям, методам расчета, технологическим свойствам и характеристикам промышленных образцов таких источников питания и УСГД посвящен ряд работ. Наиболее подробно эти вопросы освещены в [4, 5]. Общий недостаток всех подобных источников питания с УСГД заключается в том, что их построение принципиально исключает возможность осуществления бесконтактного первоначального возбуждения дуги. Кроме того, такие источники питания рассчитаны на использование синусоидального напряжения сети только промышленной частоты 50(60) Гц, в силу чего скорость изменения сварочного тока вблизи его нулевых значений остается относительно низкой, что отрицательно сказывается на условиях, влияющих на надежность повторных возбуждений дуги.

Из анализа современных тенденций развития сварочного оборудования следует, что одним из перспективных направлений совершенствования источников питания переменного тока для MMAW, SAW и TIG-AC является использование в качестве силовых модулей этих источников питания ИЕП [14, 27]. Наибольшее применение в сварочных источниках питания получили ИЕП с последовательно соединенными индуктивностью и емкостью. Эффект повышения устойчивости сварочной дуги при использовании таких источников питания обусловлен тем, что при переходе сварочного тока через нулевое значение напряже-

ние U_C на емкости ИЕП достигает своего наибольшего значения, которое в Q раз (Q — добротность сварочного контура) превышает значение ЭДС силовой вторичной обмотки сварочного трансформатора (равное напряжению дуги U_d). Вследствие этого суммарное напряжение $U_C + U_d$ и скорость изменения тока дуги dI_A/dt в окрестностях точки перехода тока дуги через нулевое значение существенно возрастают [32]. Одной из важных особенностей источников питания с ИЕП является отсутствие в сварочном токе постоянной составляющей, что оказывает благоприятное влияние на режимы работы сварочного трансформатора и его массогабаритные показатели, а также на стабильность процесса TIG-AC алюминия и его сплавов. Другая особенность таких источников питания заключается в том, что среди всех известных сварочных источников питания источники питания с ИЕП обладают наилучшими показателями ЭМС. Теоретическим и экспериментальным исследованиям по изучению и определению сварочно-технологических свойств источников питания с ИЕП, анализу электромагнитных процессов в таких источниках питания и методике их расчета, различным аспектам выбора и применения элементной базы (в частности, конденсаторов) в ИЕП посвящено множество работ, например [31–35], но наиболее полно и подробно эти вопросы, а также ряд оригинальных технических решений рассмотрены в фундаментальной работе [14].

На рис. 5 приведена структурно-функциональная схема усовершенствованного источника питания переменного тока, построенного на основе ИЕП (Заявка UA а2015 10697. Джерело живлення для дугового зварювання змінним струмом / Н. М. Махлін, О. Є. Коротинський, М. І. Скопюк. — Заявл. 03.11.2015). Этот источник питания состоит из нерегулируемого сварочного трансформатора $TV1$ с первичной обмоткой I и вторичными обмоткой II с нормальным магнитным рассеянием и

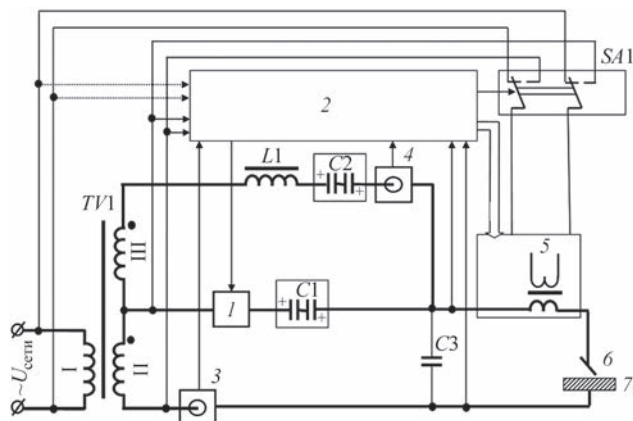


Рис. 5. Упрощенная электрическая принципиальная схема силовой части усовершенствованного источника питания с фазорегулятором во вторичной цепи и цепью подпитки, построенного на базе ИЕП

обмоткой III с развитым магнитным рассеянием, фазорегулятора сварочного тока 1, блока управления 2, индуктивного реактора (дросселя) L1, емкостных реакторов C1 и C2, датчиков сварочного тока 3 и тока подпитки 4, асинхронного возбуждателя-стабилизатора 5 с выходным импульсным трансформатором, вторичная обмотка которого включена последовательно в сварочную цепь, двухпозиционного двухполюсного коммутатора SA1 питающего возбуждатель-стабилизатор 5 напряжения, защитного конденсатора C3. Фазорегулятор 1 может быть выполнен в виде двух встречно-параллельно включенных силовых тиристоров, а коммутатор SA1 в виде двух независимых оптоэлектронных реле переменного тока.

На начальной стадии сварки тиристоры фазорегулятора 1 выключены и напряжение холостого хода источника питания определяется напряжением холостого хода цепи подпитки, в состав которой входят последовательно и согласно соединенные вторичные обмотки II и III сварочного трансформатора TV1, вспомогательные индуктивный реактор L1 и емкостной реактор C2, а также датчик тока подпитки 4. Двухпозиционный двухполюсный коммутатор SA1 находится в состоянии, обеспечивающем поступление в цепь питания асинхронного возбуждателя-стабилизатора 5 напряжения с обмотки I сварочного трансформатора TV1 (напряжения питающей сети). Осуществление кратковременного замыкания промежутка между сварочным электродом 6 и свариваемым изделием 7 при MMAW или нажатие установленного на горелке микропереключателя при TIG-AC или при MIG/MAG или нажатие соответствующей кнопки системы управления при SAW вызовет формирование в блоке управления 2 источника питания сигнала разрешения.

Вследствие этого в моменты времени, соответствующие фазе (80 ± 5) электр. град, напряжения питающей сети переменного тока или напряжения холостого хода цепи подпитки источника питания и определяемые блоком управления 2 с помощью поступающих с защитного конденсатора C3 сигналов обратной связи по напряжению на один из управляющих входов возбуждателя-стабилизатора 5 с блока управления 2 будут поступать сигналы включения ключа того контура возбуждателя-стабилизатора, который обеспечивает генерацию высоковольтных импульсов, вызывающих электрический пробой межэлектродного промежутка и возникновение в нем искрового разряда. В результате этого происходит ударная ионизация межэлектродного промежутка и создаются условия для возбуждения в этом промежутке устойчивого дугового разряда с током практически равным току подпитки.

С момента появления в межэлектродном промежутке устойчивого дугового разряда с информационного выхода датчика тока подпитки 4 на соответствующий информационный вход блока управления 2 начнет поступать сигнал, уровень которого пропорционален току подпитки, что обусловит формирование в блоке управления 2 соответствующих управляющих сигналов и их поступление на управляющие входы фазорегулятора 1, коммутатора SA1 и возбуждателя-стабилизатора 5. Это приведет к автоматическому прекращению поступления с блока управления 2 сигналов включения ключа контура возбуждателя-стабилизатора 5, обеспечивающего генерацию высоковольтных импульсов, и к переключению коммутатора SA1 в состояние, при котором в цепь питания возбуждателя-стабилизатора 5 будет поступать напряжение со вторичной обмотки II сварочного трансформатора TV1. Вслед за этим в моменты времени, определяемые блоком управления 2 с помощью поступающих с защитного конденсатора C3 сигналов обратной связи по напряжению и поступающих с информационного выхода датчика тока подпитки 4 сигналов обратной связи по току, на соответствующий управляющий вход возбуждателя-стабилизатора 5 с блока управления 2 начнут подаваться сигналы включения ключа того контура возбуждателя-стабилизатора 5, который обеспечивает генерацию стабилизирующих импульсов повышенного напряжения.

Одновременно с этим в соответствии с избранным циклом сварки начинается его выполнение и на управляющий вход фазорегулятора 1 с блока управления 2 начнут поступать сигналы включения тиристоров этого фазорегулятора, причем указанные сигналы являются результатом обработки в блоке управления 2 поступающих с информационного выхода датчика сварочного тока 3 сигналов обратной связи по току, поступающих с защитного конденсатора C3 сигналов обратной связи по напряжению и сигналов (уставок), определяющих значения параметров выбранного режима сварки. В момент полного завершения процесса сварки автоматически прекращается поступление на соответствующие информационные входы блока управления 2 сигналов с информационных выходов датчика тока подпитки 4 и датчика сварочного тока 3, на защитном конденсаторе C3 снова устанавливается напряжение холостого хода цепи подпитки. При этом в блоке управления 2 прекращается генерация сигнала разрешения и формируется сигнал запрета, что приводит к прекращению поступления на управляющие входы возбуждателя-стабилизатора 5 и переключению коммутатора SA1 в состояние, обеспечивающее подачу в цепь питания возбуждателя-стабилизатора

5 напряжения с обмотки I сварочного трансформатора *ТV1*, после чего источник питания готов к осуществлению очередного цикла сварки.

По сравнению с источником переменного тока, схема которого приведена на рис. 3, усовершенствованный источник питания с ИЕП, построенный в соответствии со схемой, представленной на рис. 5, обладает такими существенными преимуществами, как улучшение коэффициента формы сварочного тока и отсутствие зависимости этого коэффициента от угла включения тиристоров фазорегулятора, а также гораздо более высокой скоростью изменения тока подпитки при смене его полярности, что обеспечивает намного более высокую устойчивость дуги в расширенном в области малых токов диапазоне регулирования сварочного тока и, следовательно, более широкие технологические возможности. Внешние ВАХ усовершенствованного источника питания с ИЕП качественно близки к изображенным на рис. 4. Испытания опытных образцов источника питания, структура которого соответствует приведенной на рис. 5, показали способность такого источника питания обеспечивать устойчивость дуги переменного тока и стабильность ее горения при сварке штучными электродами практически с

любым типом покрытия и при сварке плавящимся электродом под слоем флюса, заметно повысить качество осуществляемых способом TIG сварных соединений за счет повышения стойкости неплавящегося электрода и снижения вероятности образования дефектов, обусловленных его эрозией, получать удовлетворительные результаты при TIG-AC алюминия и его сплавов.

Вместе с тем установлено, что в ряде важных случаев для реализации высокой степени стабильности процесса TIG-AC алюминия и его сплавов достижимая в усовершенствованном и рассчитанном на использование напряжения сети промышленных частот источнике питания с ИЕП скорость изменения тока подпитки при смене его полярности недостаточна. Но этот недостаток может быть устранен путем либо повышения в 8...10 раз частоты питающего источника напряжения, либо увеличения уровня энергии стабилизирующих импульсов повышенного напряжения. Другой существенный недостаток усовершенствованного источника питания с ИЕП обусловлен проблемами, характерными для ИЕП большой мощности и связанными с надежностью их емкостных реакторов. Однако влияние этих проблем может быть сведено к приемлемому уровню применением методов, средств и рекомендаций, приведенных в работах [14].

В целом, проведенные обширные теоретические и экспериментальные исследования, опыт практического применения различных моделей источников питания с ИЕП, успехи современного конденсаторостроения, особенно в части создания и освоения промышленного производства (на основе использования нанотехнологий) конденсаторов сверхбольшой емкости, а также наметившийся в последние годы прогресс в направлении создания новых ферромагнитных материалов с высокой индукцией насыщения дают все основания полагать, что в ближайшем будущем построенные на основе ИЕП сварочные источники питания составят серьезную конкуренцию сварочным источникам питания инверторного типа, а в некоторых случаях вытеснят последние.

Наряду с удовлетворением требования $U_2 > U_3$ другой кардинальной мерой повышения устойчивости дуги переменного тока, особенно при TIG-AC алюминия и его сплавов, является увеличение dI_A/dt до 500...800 кА/с и более вблизи точки перехода тока дуги через нулевое значение путем обеспечения прямоугольной или близкой к ней формы этого тока. На протяжении ряда прошедших десятилетий такая форма тока дуги достигалась применением либо силовых трансформаторов с нормальным магнитным рассеянием в комплекте с дросселями насыщения, работающими в режиме

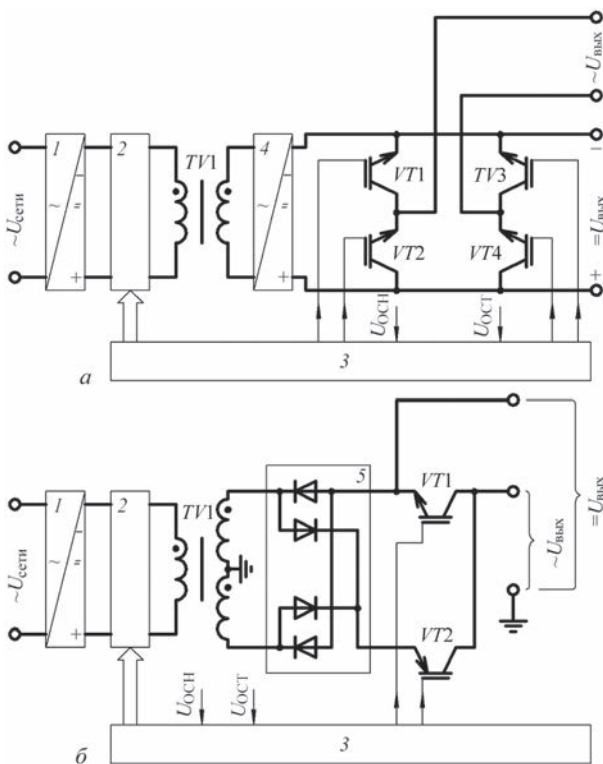


Рис. 6. Упрощенная структурно-функциональная схема источников питания инверторного типа с практически прямоугольной формой переменного сварочного тока (описание *a–б* см. в тексте): 1 — входной (сетевой) выпрямитель; 2 — высокочастотный преобразователь; 3 — блок управления; 4 — выходной высокочастотный выпрямитель; 5 — двупольный выходной высокочастотный выпрямитель (со средней точкой)

вынужденного намагничивания (например, универсальный источник питания ТИР-300Д), либо таких же трансформаторов, содержащих в своей вторичной цепи мостовой фазорегулятор, в диагональ постоянного тока которого включен силовой дроссель большой индуктивности (например, импульсный универсальный источник питания ИСВУ-315-1) [2, 36].

Из-за высокой материалоемкости и низких энергетических показателей промышленное изготовление подобных источников было прекращено еще в 70–80-е годы прошлого столетия, однако некоторое их количество продолжает находиться в эксплуатации. В настоящее время для ТIG-АС довольно широко используются универсальные источники питания инверторного типа, в которых практически прямоугольная форма сварочного тока частотой 100...400 Гц достигается или с помощью выходного силового транзисторного моста (рис. 6, а), или с помощью двуполярного высокочастотного выпрямителя и двух силовых транзисторных ключей с различным типом проводимости (рис. 6, б). Характерные для таких источников питания значения dI_A/dt в сочетании с импульсным увеличением напряжения на межэлектродном промежутке при смене полярности тока дуги обеспечивают высокую устойчивость горения дуги переменного тока (в том числе при ТIG-АС алюминия и его сплавов) во всех технологически обоснованных диапазонах длины дуги и регулирования сварочного тока. Однако при этом возможно некоторое снижение износостойкости неплавящегося электрода, что, видимо, объясняется ударными электродинамическими нагрузками, которым при прямоугольной форме сварочного тока подвергается неплавящийся электрод при каждой смене полярности тока дуги. Кроме того, построение приведенных на рис. 6 источников питания для формирования переменного тока дуги требует обязательного использования дополнительных силовых транзисторных ключей, каждый из которых должен допускать пропускание через себя тока, составляющего не менее 60 % от значения наибольшего сварочного тока, что усложняет силовую часть источника питания, повышает его стоимость и снижает КПД. Вместе с тем известно, что если переменный ток дуги достигает значения 5...6 А при ММАВ или 3...5 А при ТIG, то дуговой разряд в межэлектродном промежутке можно считать установившимся [1, 4, 5].

Из этого следует, что альтернативой инверторным источникам питания с высокой скоростью изменения тока дуги при смене его полярности могут служить источники питания, в которых при переходе сварочного тока через нулевое значение высокие значения dI_A/dt обеспечиваются лишь в

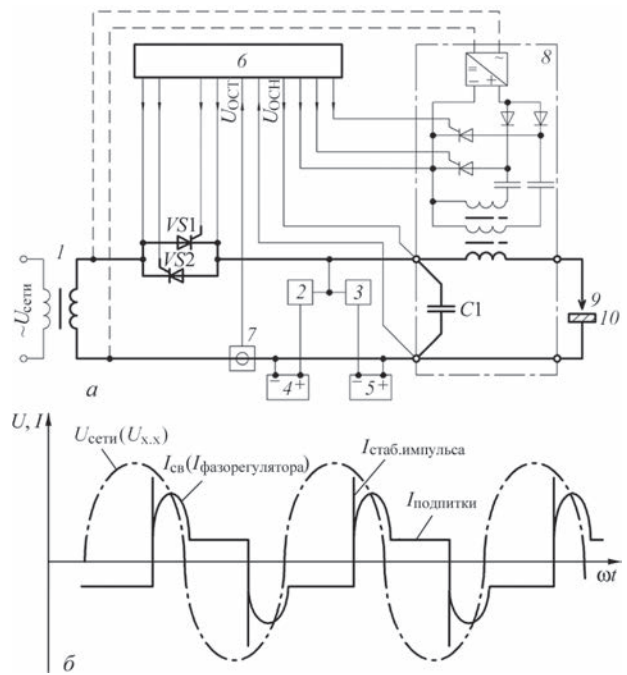


Рис. 7. Усовершенствованный источник питания с фазорегулятором и цепью подпитки с током практически прямоугольной формы: а — упрощенная структурно-функциональная схема; б — эпюры сварочного тока

диапазоне $\pm 4...6$ А. Примером такого альтернативного источника питания может быть источник питания переменного тока (например, ТТ) с цепью подпитки, формирующей переменный ток прямоугольной формы. Структурно-функциональная схема подобного источника питания, построенного согласно [37], показана на рис. 7, а. В состав этого источника питания входят сварочный трансформатор 1, фазорегулятор сварочного тока на силовых управляемых полупроводниковых ключах (например, на встречно-параллельно включенных тиристорах VS1 и VS2), защитный конденсатор C1, мощные транзисторные ключи 2 и 3, вспомогательные нерегулируемые источники питания постоянного тока 4 и 5 относительно небольшой мощности (до 0,45 кВт каждый) и с крутопадающей ВАХ, блок управления 6, датчик сварочного тока 7, асинхронный возбудитель-стабилизатор 8 с выходным импульсным трансформатором, вторичная обмотка которого включена последовательно в сварочную цепь. В начальной стадии сварки алгоритм работы и процессы в источнике питания аналогичны алгоритмам и процессам, осуществляемым в источниках питания, структурно-функциональные схемы которых показаны на рис. 3 и 5. С момента установления в промежутке между сварочным электродом 9 и свариваемым изделием 10 дугового разряда на соответствующие управляющие входы фазорегулятора сварочного тока, транзисторного ключа 2 (в положительную полуволну напряжения $U_{сети}$) или 3 (в отрицательную полуволну напряжения $U_{сети}$) и возбудителя-стабилизатора

8 начнут подаваться импульсные сигналы с блока управления 6, на который с датчика сварочного тока 7 поступают сигналы обратной связи по сварочному току, а с защитного конденсатора С1 — сигналы обратной связи по напряжению дуги. При этом возбуждатель-стабилизатор 8 автоматически перейдет из режима генерации высоковольтных импульсов для первоначального возбуждения дуги в режим генерации стабилизирующих импульсов повышенного напряжения. Включение тиристорных фазорегулятора вызывает протекание через межэлектродный промежуток сварочного тока, представляющего собой токовые знакопеременные импульсы, амплитуда и длительность которых определяются углом (фазой) включения тиристоров.

Бестоковые паузы между этими импульсами заполнены током подпитки, поддерживаемым в зависимости от его полярности с помощью источника постоянного тока 4 и ключа 2 или источника постоянного тока 5 и ключа 3. Быстрые переключения транзисторных ключей 2 и 3 происходят только при смене полярности сварочного тока и практически одновременно с этими переключениями осуществляется ввод в межэлектродный промежуток стабилизирующих импульсов повышенного напряжения. Тем самым при смене полярности тока подпитки достигаются его практически прямоугольная форма, а следовательно, и высокая скорость его изменения, что в сочетании с импульсным увеличением напряжения в межэлектродном промежутке обеспечивает надежные повторные возбуждения дуги (в том числе при TIG-AC алюминия и его сплавов).

Характерные для этого случая эпюры сварочного тока приведены на рис. 7, б. Несмотря на некоторое усложнение силовой части описанного источника питания с прямоугольной формой тока подпитки по сравнению с другими известными традиционными источниками питания переменного тока, к его достоинствам можно отнести возможность надежного функционирования при частоте напряжения $U_{\text{сети}}$, равной 50...500 Гц, а также возможность использования без серьезных затруднений такого же подхода к архитектуре цепи подпитки при построении ТТ с фазорегулятором в первичной цепи или источников питания на основе ИЕП. Основные структурно-схемные решения, приведенные на рис. 7, а, нашли применение при построении установки УДГ-301М1 УХЛ4, аппарата Н-155 и других установок и источников питания переменного тока для дуговой, плазменной и микроплазменной сварки.

Выводы

1. Расширение технологических возможностей и повышение устойчивости сварочной дуги пере-

менного тока могут быть достигнуты путем использования усовершенствованных источников питания, снабженных возбудителями-стабилизаторами (преимущественно асинхронного типа с двухконтурным ГИН и последовательным включением в сварочную цепь), имеющих в своем составе цепь подпитки с током прямоугольной формы и обеспечивающих при смене полярности тока дуги $dI_A/dt \geq 100$ кА/с.

2. Системы управления усовершенствованных источников питания должны содержать в своем составе контуры обратной связи по току и напряжению дуги.

3. Наиболее перспективными для дальнейшего совершенствования технологических и массогабаритных характеристик представляются ТТ с прямоугольной формой тока подпитки, источники питания на основе ИЕП и сварочные источники питания инверторного типа.

Автор выражает признательность д-ру техн. наук А. Е. Коротынскому и инженерам В. Ю. Буряку и Д. С. Олияненко за помощь, которую они оказали при подготовке настоящей работы.

1. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. — М.: Машиностроение, 1970. — 335 с.
2. Оборудование для дуговой сварки: Справ. пособие / С. М. Белинский, А. Ф. Гарбуль, В. Г. Гусаковский [и др.]; под ред. В. В. Смирнова. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 656 с.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением; под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
4. Дыменко В. В. Повышение стабильности процесса и расширение технологических возможностей сварки переменным током плавящимся электродом: дис. ... канд. техн. наук / В. В. Дыменко. — К.: 1985. — 277 с.
5. Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги / Б. Е. Патон, И. И. Заруба, В. В. Дыменко [и др.]. — К.: Екотехнологія, 2007. — 218 с.
6. Применение переменного тока для сварки низкоуглеродистых и легированных сталей, алюминия и его сплавов / Э. И. Шмаков, Н. М. Махлин, В. Г. Федотенков [и др.] // Монтажные и специальные работы в строительстве. — 1978. — № 4. — С. 20–22.
7. Патон Б. Е. Импульсное зажигание дуги при газозлектрической и ручной дуговой сварке / Б. Е. Патон, В. А. Завадский // Автоматическая сварка. — 1956. — № 3. — С. 26–35.
8. Лаужадис А. И. Влияние частоты тока на стабильность дуги и процесса ручной дуговой сварки / А. И. Лаужадис // Автоматическая сварка. — 1967. — № 9. — С. 29–32.
9. Пентегов И. В. Исследование условий горения дуги синусоидального тока с помощью математической модели динамической дуги / И. В. Пентегов // Автоматическая сварка. 1977. — № 3. — С. 8–11.
10. Троицкий В. А. Влияние параметров электрической цепи на повторное возбуждение дуги переменного тока / В. А. Троицкий // Автоматическая сварка. — 1975. — № 11. — С. 6–10.
11. Лугин В. П. Сравнительная оценка стабильности горения дуги при сварке штучными электродами переменным током / В. П. Лугин // Сварочное производство. — 1975. — № 1. — С. 39–40.
12. Методика определения стабильности дуги переменного тока / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, А. Е. Марченко [и др.] // Автоматическая сварка. — 1979. — № 12. — С. 16–18.

13. Arc initiation in gas metal arc welding / D. Farson, C. Courardy, J. Talkington [et al.] // *Welding Journal*. – 1998. – № 8. – С. 315–321.
14. Коротынский О. С. Високоєфективні джерела живлення для дугового зварювання на основі індуктивно-ємнісних перетворювачів: дис. ... д-ра техн. наук / Олександр Свтихійович Коротинський. – К., 2007. – 392 с.
15. Патон Б. Е. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки / Б. Е. Патон, В. К. Лебедев. – М.: Машиностроение, 1966. – 359 с.
16. Походня И. К. Плавление электрода и взаимодействие металла с газами при дуговой сварке: дис. ... д-ра техн. наук / Игорь Константинович Походня. – К., 1967. – 434 с.
17. Pat. 3328637 A1, USA. Alternating current arc power source / В. J. Aldenhoff. – June 1967.
18. Новиков О. Я. Устойчивость электрической дуги / О. Я. Новиков. – Л.: Энергия, 1978. – 160 с.
19. Пентегов И. В. Выбор напряжения холостого хода в источниках для ручной дуговой сварки переменным током / И. В. Пентегов, В. В. Дыменко, С. В. Рымар // *Автоматическая сварка*. – 1995. – № 5. – С. 35–40.
20. Андрианов А. А. Оптимизация режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока / А. А. Андрианов, В. Н. Сидоренко // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 2. – С. 5–8.
21. Махлин Н. М. Особенности бесконтактного возбуждения дуги переменного тока / Н. М. Махлин // *Автоматическая сварка*. – 2015. – № 10 – С. 30–37.
22. Темкин Б. Я. Теория и расчет возбудителей сварочной дуги: автореф. на соискание научной степени канд. техн. наук / Б. Я. Темкин. – Л., 1981. – 16 с.
23. Зажигание дуги при сварке плавящимся электродом / В. А. Ленивкин, Г. Г. Кленов, Х. Н. Сагиров [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 1986. – № 2. – С. 30–34.
24. Махлин Н. М. Анализ и методика расчета электронных устройств последовательного включения для бесконтактного возбуждения дуги / Н. М. Махлин, А. Е. Коротынский // *Автоматическая сварка*. – 2014. – № 1. – С. 34–44.
25. Махлин Н. М. Асинхронные возбудители и стабилизаторы дуги: анализ и методика расчета. Часть 1 / Н. М. Махлин, А. Е. Коротынский // *Автоматическая сварка*. – 2015. – № 3–4. – С. 25–36.
26. Махлин Н. М. Асинхронные возбудители и стабилизаторы дуги: анализ и методика расчета. Часть 2 / Н. М. Махлин, А. Е. Коротынский // *Автоматическая сварка*. – 2015. – № 7. – С. 28–40.
27. Лебедев В. К. Тенденции развития источников питания для дуговой сварки / В. К. Лебедев // *Автоматическая сварка*. – 1995. – № 5. – С. 3–6.
28. А. с. SU 1668068 A1, МКИ: В23 К 9/06. Устройство для сварки переменным током / В. Г. Федотенков, Н. М. Махлин, В. Я. Иванов. – Опубл. 07.08.1991. – Бюл. № 29.
29. Иванов Г. П. Тиристорные регуляторы тока сварочных трансформаторов / Г. П. Иванов, З. Е. Рожанский, Н. А. Сердюк // *Автоматическая сварка*. – 1973. – № 11. – С. 65–69.
30. А. с. SU 935225, МКИ: В23 К 9/06, В23 К 9/00. Устройство для сварки переменным током / Д. А. Дудко, В. Г. Федотенков, Н. М. Махлин [и др.]. – Опубл. 15.06.1982. – Бюл. № 22.
31. Исследование эластичности сварочной дуги, питаемой от источника с индуктивностью и емкостью / В. Ю. Арлаускас, И. Р. Нарушкявичус, В. Н. Дубашинский Ф. Ф. Николаев [и др.] // *Сварочное производство*. – 1974. – № 10. – С. 14–16.
32. Лебедев В. К. Устойчивость горения дуги переменного тока в цепи с конденсатором / И. К. Лебедев, И. Р. Нарушкявичус // *Автоматическая сварка*. – 1971. – № 4. – С. 3–5.
33. Нарушкявичус И. Р. Исследование многопостового сварочного источника с индуктивностью и емкостью для сварки легированных сталей / И. Р. Нарушкявичус, И. М. Наркявичюс, И. С. Вишняк // *Тезисы докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.: Разработка, исследование и внедрение новых источников питания сварочной дуги (21–22 мая 1981)*. – Ч. 2. – 1981. – С. 9–14.
34. Троицкий В. А. Способ плавного регулирования источников питания, содержащих продольно-емкостную компенсацию / В. А. Троицкий // *Автоматическая сварка*. – 1981. – № 5. – С. 8–12.
35. Лебедев В. К. Дуга переменного тока в цепи с последовательно соединенными индуктивностью и емкостью / В. К. Лебедев, А. Е. Коротынский // *Автоматическая сварка*. – 1994. – № 12. – С. 47–48.
36. Голошубов В. І. Зварювальні джерела живлення: Навчальний посібник / В. І. Голошубов. – К.: Арістей, 2005. – 448 с.
37. А. с. SU 1299725 A1, МКИ: В23 К 9/00, 9/06. Устройство для дуговой сварки переменным током / В. Г. Федотенков, Н. М. Махлин, А. Я. Яшунский [и др.]. – Опубл. 30.03.1987. – Бюл. № 12.

Поступила в редакцию 28.12.2015

Производство стали в Украине

Как сообщают металлурги страны, производство стали в Украине выросло на 14 % в течение первых пяти месяцев 2016 г. (до 10,6 млн т), в основном, благодаря увеличению спроса со стороны местного рынка и экспортеров. До этого производство стали в Украине в 2015 г. упало на 16 % (до 22,9 млн т), в основном, из-за военного конфликта на востоке страны, где сосредоточено большинство металлургических заводов. Металлургические заводы ожидают, что производство чугуна сможет оставаться стабильным в июне на уровне 2,1 млн т, а выпуск проката — 1,9 млн т. Производство украинской стали в июле, вероятно, останется также на высоком уровне — около 2,2 млн т. Сталь, химикаты и сельскохозяйственные товары составляют большую часть экспорта Украины.



<http://www.azovpromstal.com/news>