

К. т. н. Ю. Э. ПАЭРАНД, Ю. В. БОНДАРЕНКО,
А. Ф. БОНДАРЕНКО

Украина, г. Алчевск, Донбасский государственный технический
университет
E-mail: paerand@mail.ru, bondarenkoaf@gmail.com

Дата поступления в редакцию
18.10 2007 г.

Оппонент д. т. н. А. Ф. КАДАЦКИЙ
(ОНАС, г. Одесса)

ФОРМИРОВАТЕЛИ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Предложена классификация формирователей импульсов тока для контактной сварки, учитывающая новые схемотехнические решения в данной области и тенденции ее развития.

Одной из важнейших составляющих оборудования для контактной сварки являются формирователи импульсов тока. Именно на них возлагается задача обеспечения необходимых для сварки амплитуды, длительности протекания и формы импульса сварочного тока, от которых напрямую зависит качество получаемых соединений. В связи с тем, что уровень развития электронной техники, приборостроения предъявляет все более возрастающие требования к качеству сварных соединений, возрастают и требования к параметрам формируемых импульсов, а также к характеристикам формирователей этих импульсов.

Для решения ряда технических задач, связанных с проектированием формирователей импульсов тока для контактной сварки (ФИТКС), возникает необходимость в проведении анализа принципов построения таких формирователей с позиций их функциональных возможностей, быстродействия, точности отработки заданной формы сварочных импульсов, влияния формирователя на питающую сеть. На данный момент можно констатировать отсутствие публикаций, способных достаточно полно осветить рассматриваемый класс устройств преобразовательной техники, дать представление об их основных характеристиках. В существующих публикациях не отражены новые схемотехнические решения в рассматриваемой области, а также современные тенденции ее развития. Кроме того, ни в одной из известных работ четко не выделены признаки, на основе которых можно классифицировать формирователи импульсов для контактной сварки. Так что, несмотря на имеющуюся информацию, получить представление о формирователях импульсов как классе устройств преобразовательной техники довольно сложно.

Целью работы является анализ и обобщение принципов построения формирователей импульсов тока для контактной сварки, а также выделение признаков, по которым можно классифицировать такие преобразователи, и составление на их основе современной классификации.

Контактные машины по типу источника сварочного тока классифицируют следующим образом: переменного тока, низкочастотные, постоянного тока и конденсаторные. Подобной классификации придерживаются авторы [1, 2]. В современной машиностроительной энциклопедии [3] к указанным типам источников сварочного тока добавлен еще один — повышенной частоты. Авторы [4] формирователи импульсов разделяют по количеству фаз питающей сети (одно- и трехфазные) и по типу источника питания (однофазные переменного тока, постоянного тока, низкочастотные и импульсные — конденсаторные и электромагнитные). В работе [5] выделены четыре типа ФИТКС: 1) с непосредственным питанием от сети через тиристорный контактор; 2) с питанием сварочного трансформатора разрядом батареи конденсаторов; 3) формирователи, которые представляют собой комбинацию двух предыдущих, причем первый из них используется для подогрева соединяемых деталей, для стабилизации контактных сопротивлений, а второй — для последующей сварки; 4) формирователи, обеспечивающие питание сварочного трансформатора током повышенной частоты.

Зарубежные авторы и многие фирмы-производители придерживаются следующей классификации: формирователи импульсов переменного тока на основе тиристорных регуляторов переменного напряжения (AC Type), формирователи импульсов на основе разрядно-конденсаторных структур (Capacitive Discharge Type), формирователи импульсов постоянного тока на основе транзисторных регуляторов (Transistor Type или Linear DC Type), формирователи импульсов на основе инверторных преобразователей (Inverter Type). В [6] приведено разделение формирователей импульсов на две большие группы: ФИТКС, потребляющие энергию из сети только во время сварки (Direct Energy), и ФИТКС, осуществляющие накопление энергии в паузах между сварками (Energy Storage). К первой группе авторы отнесли следующие типы формирователей: однофазные переменного тока (Single-Phase Alternating Current); однофазные переменного тока с коррекцией коэффициента мощности (Single-Phase Alternating Current Plus Correction to Reduce KVa Demand); ФИТКС с распределенной нагрузкой (Load Distributing Type); преобразователи частоты (Frequency Converters); выпрямители (Dry-Disc Rectifier). Ко второй группе от-

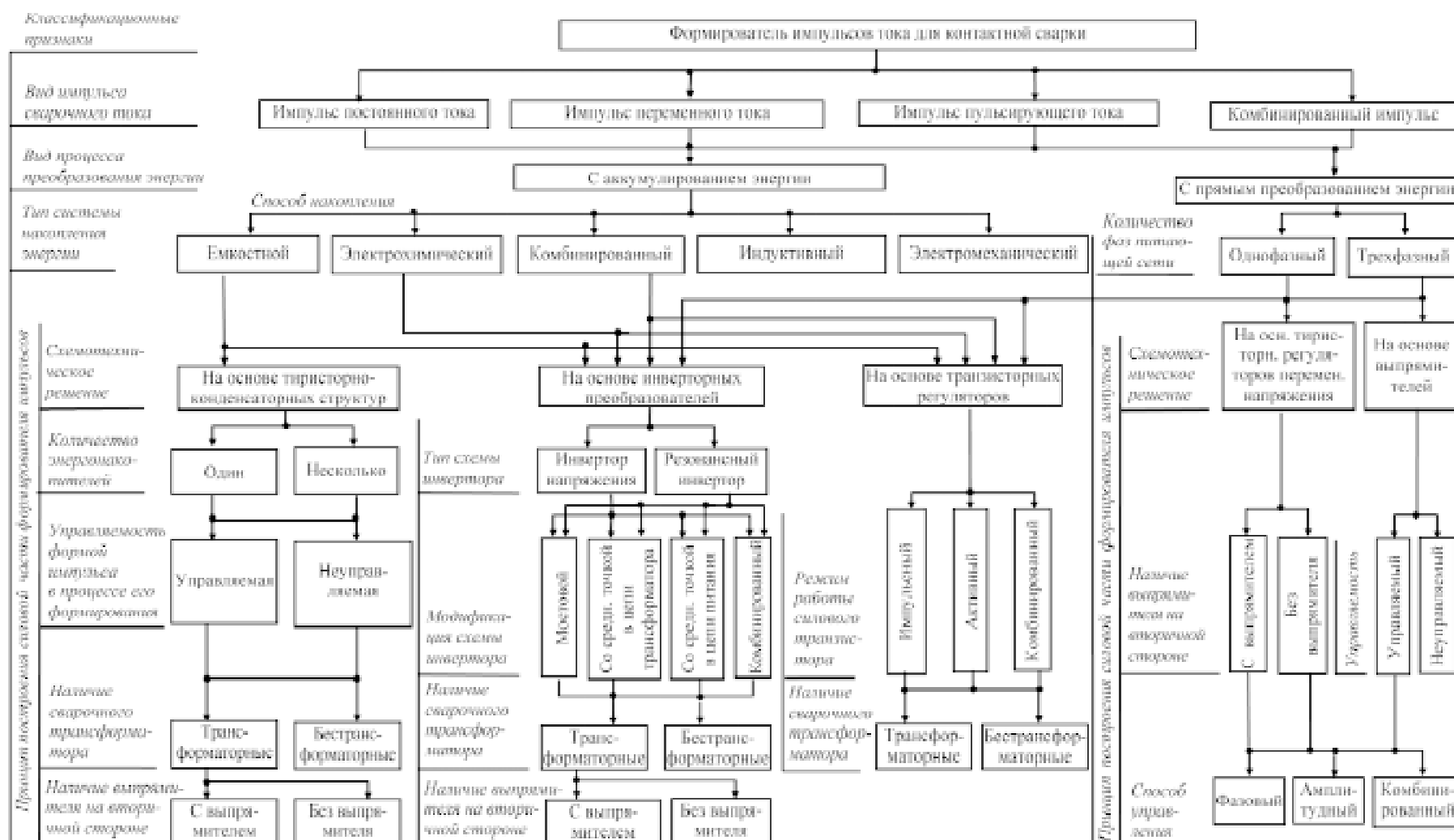


Рис. 1. Классификационная схема формирователей импульсов тока для контактной сварки

носятся формирователи разрядно-конденсаторные (Capacitor Discharge), электромагнитные (Electromagnetic), с аккумуляторной батареей (Storage Battery), электромеханические, в которых энергия запасается во вращающемся маховике (Homopolar Generator).

Очевидно, что общепринятая отечественная и зарубежная классификации имеют существенные отличия. Следует также отметить, что в известных классификациях, за исключением [4, 7], не выделены четко классификационные признаки.

Анализ литературы, патентов, каталогов, технических описаний и др., содержащих сведения о ФИТКС, позволил выделить основные признаки и составить классификационную схему формирователей импульсов, представленную на **рис. 1**.

Наиболее общим классификационным признаком можно считать *вид формируемого импульса сварочного тока*, в соответствии с которым можно выделить группы формирователей импульсов постоянного, переменного и пульсирующего тока [8], а также комбинированных импульсов тока [9]. Наиболее характерные формы импульсов сварочного тока показаны на **рис. 2**.

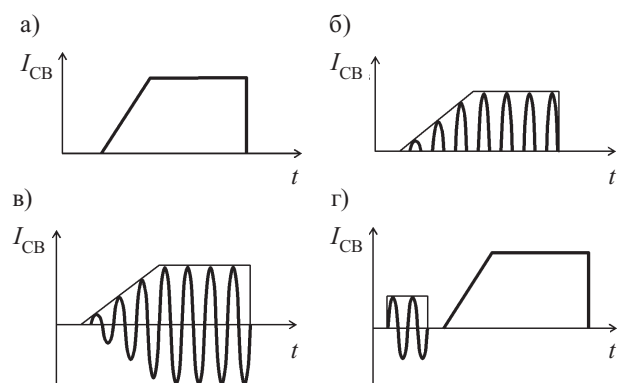


Рис. 2. Формы импульсов сварочного тока:

а — постоянного; б — пульсирующего; в — переменного; г — комбинированный

По виду преобразования энергии ФИТКС можно разделить на две группы: формирователи с прямым преобразованием энергии (Direct Energy) [1, 2, 6, 7], преобразующие энергию непосредственно из питающей сети в процессе сварки, и формирователи с аккумулятированием энергии (Stored Energy) [10], преобразующие в процессе сварки предварительно запасенную в системах накопления энергию.

ФИТКС с прямым преобразованием энергии по количеству фаз питающей сети можно разделить на одно- и трехфазные [4].

Также ФИТКС с прямым преобразованием энергии питающей сети делятся по схемотехническому решению силовой части. Различают схемы на основе тиристорных регуляторов переменного напряжения [11, 12], на основе выпрямителей [1, 2], на основе инверторных преобразователей [13, 14], на основе транзисторных регуляторов [15].

Как правило, все схемы на основе тиристорных регуляторов переменного напряжения (**рис. 3**) содержат сварочный трансформатор, в связи с чем их мож-

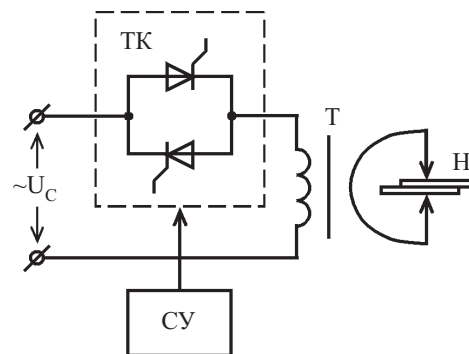


Рис. 3. Схема ФИТКС на основе тиристорного регулятора напряжения:

ТК — тиристорный коммутатор; СУ — система управления; Т — трансформатор; Н — нагрузка

но разделить на две группы: с выпрямителем на вторичной стороне сварочного трансформатора [1, 4] и без выпрямителя [11, 12].

Схемы формирователей импульсов на основе выпрямителей (**рис. 4**) по управляемости процессом формирования можно разделить на управляемые и неуправляемые.

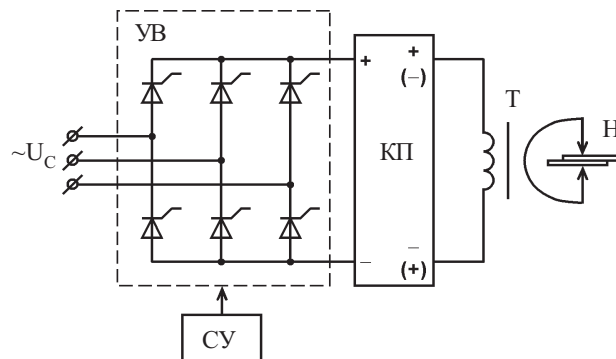


Рис. 4. Схема ФИТ на основе выпрямителя:

КП — коммутатор полярности; УВ — управляемый выпрямитель

Схемы ФИТКС на основе тиристорных регуляторов переменного напряжения и схемы на основе управляемых выпрямителей по способу управления можно разделить на следующие типы: с фазовым управлением (изменением угла отпирания тиристор); с амплитудным управлением (изменением коэффициента трансформации сварочного трансформатора); с комбинированным (амплитудно-фазовым) управлением.

ФИТКС с аккумулятированием энергии по типу системы накопления энергии можно разделить на группы с емкостными, электрохимическими, индуктивными, электромеханическими [1, 2, 6, 10, 16] и комбинированными накопителями [17].

Для ФИТКС с аккумулятированием энергии различают следующие *схемотехнические решения силовой части*: схемы на основе тиристорно-конденсаторных структур [1, 6, 16, 18], на основе инверторных преобразователей [17, 19, 20] и на основе транзисторных регуляторов [21—23].

Схемы формирователей импульсов с аккумулятированием энергии на основе тиристорно-конденсаторных структур (**рис. 5**) можно, в свою очередь, разде-

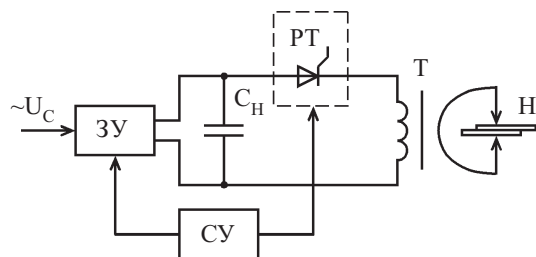


Рис. 5. Схема ФИТКС с аккумуляцией энергии:
ЗУ — зарядное устройство; РТ — разрядный тиристор

лить по количеству разряжающихся независимо друг от друга энергонакопительных конденсаторов (с одним или несколькими энергонакопителями); по управляемости формой импульса в процессе его формирования (управляемые и неуправляемые); по наличию сварочного трансформатора (трансформаторные и бестрансформаторные); по наличию выпрямителя на вторичной стороне (с выпрямителем и без выпрямителя).

ФИТКС на основе инверторных преобразователей могут быть построены как по схеме с прямым преобразованием энергии питающей сети [13, 14], так и по схеме с аккумуляцией энергии (рис. 6) [19, 20, 24]. Далее их можно разделить таким образом:

— по типу применяемых для контактной сварки схем — ФИТКС на основе инверторов напряжения [14] и ФИТКС на основе резонансных инверторов [24];

— по модификации схемы инвертора — мостовые [13, 14], со средней точкой в цепи трансформатора [19, 20], со средней точкой в цепи питания [25] и комбинированные [24];

— по наличию сварочного трансформатора — трансформаторные и бестрансформаторные;

— по наличию выпрямителя вторичной стороне [13] — ФИТКС с выпрямителем и ФИТКС без выпрямителя.

ФИТКС на основе транзисторных регуляторов могут быть построены как по схеме с прямым преобразованием энергии питающей сети [15], так и по схеме с аккумуляцией энергии [21—23, 31] (рис. 7).

Из этой группы ФИТКС на основе транзисторных регуляторов можно разделить:

— по режиму работы силовых транзисторов — импульсные [22], активные [21, 23, 31] и комбинированные;

— по наличию сварочного трансформатора — трансформаторные [15, 21] и бестрансформаторные [21—23].

Рассмотрение ФИТКС с позиций теории автоматического регулирования позволяет классифицировать их по такому признаку как *управляемость процессом формирования* на две группы: неуправляемые и управляемые с системами автоматического регулирования [21, 26]. Управляемые формирователи с системами автоматического регулирования всегда выполняются как системы программного регулирования и бывают разомкнутыми, замкнутыми, системами компенсации (регулирование по возмущению) или комбинированными. Формирователи импульсов с замкнутыми системами программного регулирования по характеру внутренних динамических процессов можно разделить на системы непрерывного действия и системы дискретного действия.

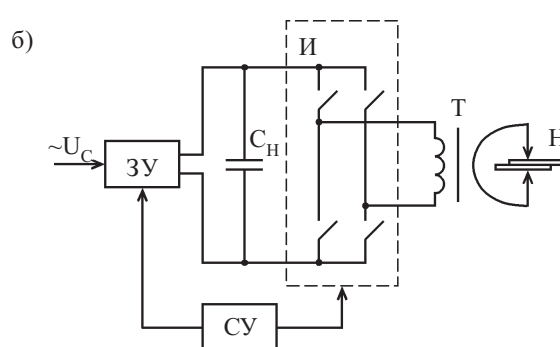
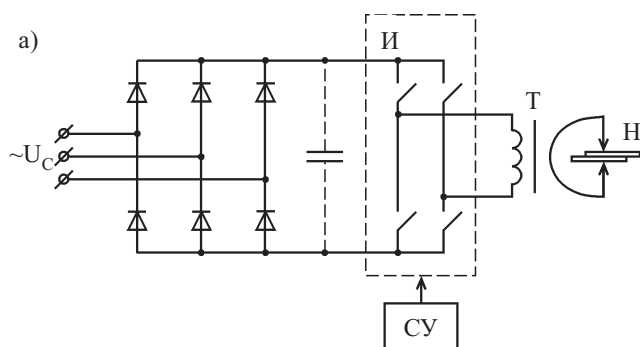


Рис. 6. Схемы ФИТКС на основе инверторных преобразователей (И):
а — с прямым преобразованием энергии сети; б — с аккумуляцией энергии

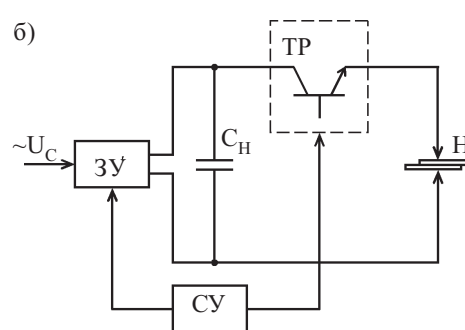
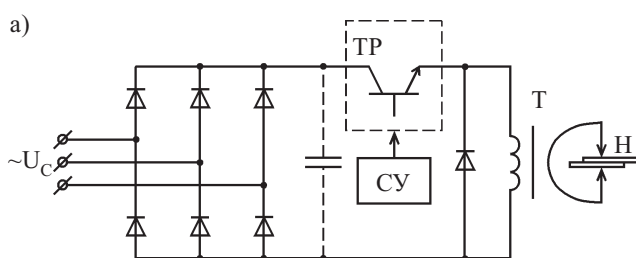


Рис. 7. Схемы ФИТКС на основе транзисторных регуляторов (ТР):
а — с прямым преобразованием энергии; б — с аккумуляцией энергии

В формирователях, представляющих собой разомкнутые системы регулирования, форма сварочных импульсов определяется параметрами элементов разрядного контура, и возможность ее изменения в процессе сварки отсутствует, поэтому нужную форму сварочного импульса и, соответственно, высокое качество соединения удастся получить не всегда.

Особое положение в области контактной сварки занимает контактная микросварка, которая обеспечивает соединение миниатюрных деталей малой толщины и малых сечений (от нескольких микрометров до 0,5 мм) [1]. Контактная микросварка имеет свои особенности, которые создают дополнительные сложности при разработке технологии сварки и выборе типа формирователя импульсов. Среди таких особенностей выделяют очень малую длительность процесса сварки и существенно возрастающую роль переходных контактных сопротивлений как источников теплоты вследствие увеличения значений и разброса этих сопротивлений. Необходимо отметить, что режимы контактной сварки принято называть мягкими, если длительность сварки $t_{\text{св}} \geq 0,1$ с, и жесткими при $t_{\text{св}} < 0,1$ с [1, 16]. Однако для микросварки время $t_{\text{св}}$ может составлять десятые доли миллисекунды и меньше. В связи с этим авторами [16] было введено понятие о «сверхжестких» режимах контактной сварки, которые являются наиболее характерными для микросварки ($t_{\text{св}} \leq 0,01$ с).

Используя классификационную схему на рис. 1, проведем анализ возможных вариантов построения ФИТКС для контактной микросварки.

Сравнивая ФИТКС по виду преобразования энергии, можно сделать вывод, что более предпочтительными для контактной микросварки являются формирователи импульсов с аккумулярованием энергии, поскольку в таком случае отсутствуют проблемы электромагнитной совместимости формирователей с питающей сетью, легко обеспечивается накопление нужного количества энергии (ввиду того, что для микросварки необходимо небольшое количество энергии), а также снижается потребляемая из сети мощность. Эффективность использования аккумулятора энергии как средства снижения потребляемой мощности из сети, в частности, для емкостного накопителя, может быть оценена соотношением [1, 16]:

$$\frac{P_3}{P_p} = \frac{t_p}{t_3 \cdot \eta},$$

где t_3 и t_p — время заряда и разряда накопителя;

P_3 и P_p — соответственно средние мощности процессов заряда и разряда накопителя;

η — КПД формирователя импульсов.

Обычно время заряда t_3 больше времени разряда t_p в 100 и более раз. В результате этого может быть достигнуто значительное, иногда до нескольких десятков раз, снижение установленной мощности формирователей с аккумулярованием энергии по сравнению с формирователями, позволяющими получать импульсы с теми же параметрами, но с прямым преобразованием энергии питающей сети [2].

Сравнивая схемотехнические решения формирователей импульсов с аккумулярованием энергии, необходимо отметить, что в формирователях на основе тиристорно-конденсаторных структур (рис. 4) форма сварочного импульса задается только до начала процесса формирования. Сложный характер изменения контактных сопротивлений при микросварке может приводить к недопустимым отклонениям формы импульса и, как следствие, к появлению различных дефектов микросварных соединений, в частности, выплесков расплавленного металла.

Менее чувствительными к изменениям контактных сопротивлений являются формирователи, построенные в виде замкнутых систем регулирования с обратными связями, на основе инверторных схем и транзисторных регуляторов. Однако быстроедействие таких формирователей при импульсном характере процесса регулирования ограничено присутствием в контуре обратной связи фильтрующих элементов, существенно снижающих быстроедействие, а также отрицательно влияющих на устойчивость системы в целом. Сложный нелинейный характер нагрузки формирователя в сочетании со специальными законами изменения импульсов накладывает специфические требования на динамические характеристики формирователя, которые не всегда удастся обеспечить.

Рассмотренные выше недостатки лишены формирователи на основе транзисторных регуляторов [21, 23, 27—31]. Непрерывный режим работы транзисторов, осуществляющих регулирование сварочного тока, позволяет достигать наилучших показателей точности и быстроедействия и получать сварные соединения малогабаритных деталей высокого качества. Кроме того, для таких схем возможно исключение электрически инерционного, громоздкого и нетехнологичного в производстве сварочного трансформатора, благодаря чему достигается значительное повышение точности обработки формы сварочного импульса [21]. Следует отметить, что вопросы, связанные с низким КПД формирователей, работающих в активном режиме, неактуальны при относительно небольших мощностях импульсов микросварки.

Последние достижения в области производства полупроводниковых приборов и микросхемотехники привели к обновлению элементной базы силовой электроники, появлению мощных полностью управляемых полупроводниковых приборов, однокристальных микроконтроллеров, высокочастотных электролитических конденсаторов. Все это, несомненно, способствует появлению новых решений при проектировании формирователей для контактной микросварки и систем управления ими [32], а также подтверждает вывод, сделанный с использованием предложенной классификации о том, что наиболее перспективными для контактной микросварки являются бестрансформаторные формирователи импульсов с аккумулярованием энергии на основе транзисторных регуляторов, работающих в активном режиме.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Технология и оборудование контактной сварки: Учебник для машиностроительных вузов / Под ред. Б. Д. Орлова.— М.: Машиностроение, 1986.
2. Кочергин К. А. Контактная сварка — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1987.
3. Машиностроение. Энциклопедия. Оборудование для сварки. Т. IV-6/ В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, А. И. Четвертко и др. Под ред. Б. Е. Патона.— М.: Машиностроение. 1999.
4. Глебов Л. В., Филиппов Ю. И., Чулошников П. Л. Устройство и эксплуатация контактных машин.— Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1987.
5. Пат. 72571 України. Спосіб контактного точкового мікрозварювання з автоматичним керуванням / В. К. Лебедев, О. О. Письменний.— 15.01 2004, Бюл. № 1.
6. Пат. 6303894 США. Resistance welding with an electrochemical capacitor as the current power source / D. Laser, N. Klein, C. Yarnitzky.— 16.10 2001.
7. Рыськова З. А., Федоров П. Д., Жимерева В. И. Трансформаторы для электрической контактной сварки.— Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е.— 1990.
8. Кабанов Н. С. Сварка на контактных машинах: Учебник для проф.-техн. училищ.— М.: Высш. школа, 1979.
9. Пат. 5483035 США. System for and method of controlling resistance welder / Kawai Shingo, Sahashi Kenji.— 09.01 1996.
10. Моравский В. Э. Сварка аккумулированной энергией.— Киев: Гостехиздат УССР, 1963.
11. Manjunath T. C., Janardhanan S., Kubal N. S. Simulation, design, implementation and control of a welding process using micro-controller // 5th Asian Control Conference, 2004.— Vol. 2.— P. 828—836.
12. Пат. 2245236 Российской Федерации. Цифровой дозатор электроэнергии для точечной сварки / А. П. Попов, А. О. Чугулев, А. Ю. Власов.— 27.08 2004.
13. Пат. 2006026667 Японії. Resistance welding equipment / Hagiwara Kiyokuni, Oshima Kazuo.— 02.02 2006.
14. Исаев А. П., Милованов А. В. Инверторный источник сварочного тока для контактной сварки // Сварочное производство.— 2005.— № 3.— С. 34—38.
15. Пат. 2919360 Германии. Geregelter Schweißstakter / Hoestermann Karl-Ernst.— 20.11 1980.
16. Моравский В. Э., Ворона Д. С. Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки.— Киев: Наук. думка, 1985.
17. А. с. 1709501 СССР. Генератор импульсов тока регулируемой формы / О. А. Герасев, А. М. Никитин, В. М. Опре, В. А. Свиридов.— 1992.— Бюл. № 4.
18. Пат. 4041081 Японії. Resistance welding machine and resistance welding method / Kurazono Kazunori; Maikuro Denshi KK.— 12.02 1992.
19. Пат. 2004001940 ВОИС. High-current power supply using storage battery / Sonoda Toshikatsu, Wada Akio.— 31.12 2003.
20. Yoshiaki Takasaki, Toshikatsu Sonoda, Seiya Fujii. Development of a Magnetic Flux Controlled-Type Spot-Welding Machine // IEEE Trans. IA.— 2005.— Vol. 125, N. 5.— P. 420—425.
21. Атауш В. Е., Леонов В. П., Москвин Э. Г. Микросварка в приборостроении.— Рига: РТУ, 1996.
22. Пат. 2001047982 США. Resistance welding power supply apparatus / Mikio Watanabe; Miyachi Technos KK.— 06.12 2001.
23. Пат. 9323173 Японії. Welding electric source device and controlling method thereof / Ito Atsushi; Nippon Avionics Co Ltd.— 16.12 1997.
24. Пат. 5294768 США. Electrical supply circuit for the generation of separately controllable current pulses / Breitmeier Max (Швейцария).— 15.03 1994.
25. Пат. 3027315 Германии. Verfahren zur regelung der abgegebenen leistung eines generators fuer elektro-schweiss-elektroden, verwendung des verfahrens sowie vorrichtung zur ausfuehrung des verfahrens / Rossell Jame.— 11.02 1982.
26. Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша.— К.: Вища шк., Головное изд-во, 1986.
27. Леонов В. П., Атауш В. Е. Малоинерционный источник питания для микросварки и пайки с обратной связью по электро-энергетическим параметрам // Припой для пайки современных материалов. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985.— С. 133—139.
28. Паэранд Ю. Э., Бондаренко А. Ф. Формирователь импульсов специальной формы для контактной микросварки // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енерго-ефективність».— 2006.— Ч. 5.— С. 27—32.
29. Пат. 21356 України. Пристрій для керування процесом контактного точкового зварювання / Паэранд Ю. Е., Бондаренко О. Ф.— 15.03 2007, Бюл. № 3.
30. Пат. 79189 України. Пристрій для керування процесом контактного точкового зварювання / Паэранд Ю. Е., Бондаренко О. Ф.— 25.05 2007, Бюл. № 7.
31. Леонов В. П., Атауш В. Е., Греченкова А. А., Барабанщикова Л. А. Источник сварочного тока с программируемыми электрическими параметрами и формой импульса // Сварочное производство.— 1987.— № 1.— С. 27—28.
32. Лебедев В. К. Тенденции развития источников питания и систем управления (по материалам патентов США) // Автоматическая сварка.— 2004.— №1.— С. 40—48.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Глинченко А. С., Егоров Н. М., Комаров В. А., Сарафанов А. В. Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий.— М.: ДМК пресс, 2008.— 352 с.

Рассмотрены задачи, методы и особенности автоматизированного лабораторного практикума с удаленным доступом по исследованию полупроводниковых приборов, приведено описание реализующей его системы АЛП УД «Электроника». Приведены задания и методические указания к лабораторным работам по экспериментальному исследованию и моделированию полупроводниковых диодов, стабилитронов, полевых и биполярных транзисторов, включающие измерение их вольт-амперных характеристик и параметров, исследование технологического разброса и работы на переменном токе.

Предназначена для студентов вузов и учащихся технических специальностей колледжей, профессиональных училищ и лицеев для использования в лабораторном практикуме дисциплины «Электроника» и других родственных дисциплин.