



СОСТОЯНИЕ, ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СВАРОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ (Обзор)

А. Е. КОРОТЫНСКИЙ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены основные этапы эволюции высокочастотных сварочных преобразователей, выполненных на основе силовых транзисторных коммутаторов. Показано, что основные успехи в создании сварочного оборудования данного типа главным образом связаны с достижениями в области силовой электроники. Описаны новые типы силовых модулей на основе распределения структур и циклоконверторных схем. Намечены пути дальнейшего совершенствования и развития высокочастотных сварочных источников.

Ключевые слова: дуговая сварка, инвертор, высокочастотный сварочный преобразователь, силовой ключ, чоптер-модуль

Объем наплавленного металла, полученный дуговой сваркой, во всем мире превышает 90 %. Этот способ создания неразъемных соединений является основным технологическим процессом, поэтому разработчики и производители сварочного оборудования (СО) уделяют ему особое внимание. Источники питания (ИП) сварочной дуги являются одним из основных элементов технологической цепи, в значительной степени влияющим на качество получаемых сварных соединений, а также на технико-экономические показатели процесса дуговой сварки в целом.

Процесс эволюции ИП для дуговой сварки прошел следующие этапы:

- снижение материалоемкости в основном за счет уменьшения массы и габаритов трансформаторов;
- улучшение энергетических показателей источников питания (КПД и коэффициента мощности) в связи с возрастающими требованиями энергосбережения;

- расширение функциональных возможностей источников питания, необходимых для дальнейшего решения задач механизации и автоматизации сварочного производства;

- повышение требования к электромагнитной совместимости (ЭМС), обусловленное тем, что как в промышленном производстве, так и в быту появилось большое количество высокочувствительных к электромагнитным помехам электронных устройств.

Эти этапы, достаточно подробно отраженные в работе [1], обусловлены с достижениями в области полупроводниковой электроники. Переход от сварочных трансформаторов к выпрямителям был обусловлен появлением на рынке надежных силовых диодов. Разработка тиристорных (управляемых выпрямителей) позволила создавать ИП с управляемыми по цепи обратной связи внешними характеристиками. Это существенно расширило функциональные возможности ИП, поскольку ста-

ло реальным создание универсального СО для различных способов дуговой сварки.

Дальнейшее совершенствование тиристорных, связанное с расширением их частотного диапазона, уменьшением динамических потерь, а также улучшением показателей надежности, позволило создать высокочастотные сварочные инверторы с малыми массогабаритными характеристиками. Подробный анализ работ, проведенный в этом направлении, отражен в работе [2]. И хотя в последние годы заметно снизился интерес к разработкам в этой области, но уже достигнутые результаты в создании произвольно выключаемых тиристорных [3] позволяют предположить, что это явление временное. Об этом также свидетельствуют достижения в области создания реверсивно-включаемых динисторов (РВД) [4], которые могли бы служить идеальным ключевым элементом для мощных сварочных источников, рассчитанных на токи свыше 1000 А. Реверсивно-включаемый динистор является полупроводниковым прибором тиристорного типа, но в отличие от последнего имеет проводимость в обратном направлении. Поскольку у него отсутствует управляющий электрод, его отпирание производят путем пропуска короткого импульса тока обратной полярности — так называемого импульса тока накачки. Такие особенности, конечно, создают определенные трудности при построении схем управления РВД, однако они легко преодолимы. На их основе уже созданы мощные высокочастотные (ВЧ) генераторы непрерывных колебаний применительно к задачам высокочастотной обработки и закалки металлов. Что касается области сварки, то, к сожалению, приходится констатировать, что разработчики СО пока не обратили серьезного внимания на этот тип мощного электронного ключа.

Следует отметить, что основные успехи последнего десятилетия в области производства СО в основном связаны со сварочными высокочастотными преобразователями (ВЧП), выполненными на транзисторных коммутаторах. Анализу состояния основных тенденций и перспектив развития этого класса посвящена настоящая работа.

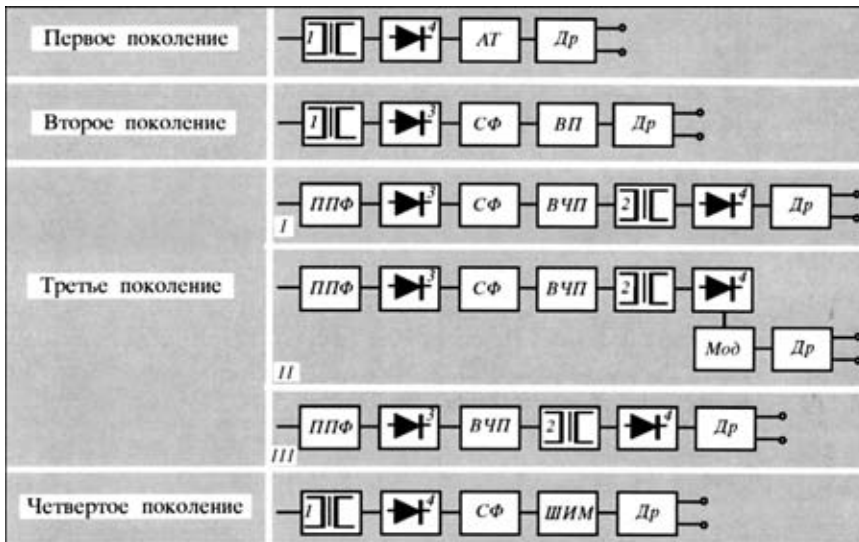


Рис. 1. Эволюция транзисторных ВЧП: *AT* — аналоговый транзистор; *ППФ* — помехоподавляющий фильтр; *СФ* — сглаживающий фильтр; *ВЧП* — высокочастотный преобразователь; *ВП* — вторичный преобразователь; *Мод* — модулятор; *Др* — дроссель; *ШИМ* — широтно-импульсный модулятор; *1* — НЧ-трансформатор; *2* — ВЧ-трансформатор; *3, 4* — соответственно первичный и вторичный выпрямитель; *I-III* — см. объяснения в тексте

Эволюция транзисторных ВЧП. Первые попытки использования транзисторов в СО применительно к микросварке относятся к 1960-м годам. К. К. Хреновым и А. Н. Миляхом [5] была предложена схема источника с мощным регулирующим транзистором во вторичной цепи. Требуемая внешняя характеристика создается благодаря действию обратной связи по напряжению на дуге. Однако в таких схемах из-за сравнительно высокого напряжения холостого хода $U_{x.x}$ энергия, выделяющаяся на транзисторе, оказывается достаточно большой. Применение таких схем для источников, рассчитанных на ток более 100 А, путем параллельного включения нескольких транзисторов оказалось неудачным из-за невысокой надежности транзисторов.

Повышение надежности ВЧП (транзисторных источников) потребовало создания высокочастотных силовых элементов, способных работать в ключевых режимах. На этапе создания второго поколения транзисторных источников (рис. 1) в структуре силового блока появляется вторичный преобразователь (*ВП*), работающий в режиме ключа. Таким образом от аналогового регулятора переходят к дискретному и тем самым исключают потери, которые прежде выделялись на эмиттер-

но-коллекторном переходе регулирующего транзистора. Однако такие решения также не обеспечивали сокращения расходов активных материалов и уменьшения габаритов, поскольку классический сварочный трансформатор все-таки оставался.

Третье поколение транзисторных ВЧП, которое связано с появлением на рынке надежных высоковольтных транзисторов с высокими динамическими параметрами и малыми потерями, начало интенсивно развиваться в 1990-е годы. В это время появляется ряд схемотехнических решений с бестрансформаторным входом [6] (рис. 1, *III*), что позволило существенно уменьшить массогабаритные характеристики источников. Эти устройства выполнены на ВЧ-трансформаторах, которые включаются на выходе силового ВЧП. Масса и габариты

таких сварочных трансформаторов по сравнению с традиционными сокращаются в 40...50 раз. Ведение обратных связей по току и напряжению позволяет создавать универсальные сварочные преобразователи для любых способов дуговой сварки и сварки стержневым электродом — ТИГ, МИГ/МАГ, ММА [7, 8]. В последние годы тенденция усовершенствования ИП наблюдается во всех ведущих фирмах — производителях СО [9–14]. Применительно к задачам сварки алюминиевых сплавов созданы инверторы переменного тока [8, 11] с регулируемым как по амплитуде, так и по длительности сварочным током в положительной и отрицательной части периода. Некоторые авторы решают эту задачу путем включения в схему транзисторного преобразователя дополнительного модулятора *Мод* (рис. 1, *II*) [14, 15], улучшающего не только сварочно-технологические свойства источника, но и снижающего энергопотребление.

Известны технические решения [16], в которых отсутствует конденсатор сглаживающего фильтра *СФ*. Эти устройства (рис. 1, *II*) реализуют метод силового синхронного выпрямления и способны работать при достаточно низких (до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах. Их опытная эксплуатация при ММА сварке дала положительные результаты.

Следующий этап в развитии СО (четвертое поколение ИП) начался в конце 1990-х годов и связан с появлением чоппер-модулей [17], представляющих собой согласованную диодно-транзисторную структуру (а именно, основной диод и транзистор имеют одинаковые рабочие токи и напряжения). Чоппер-модули в основном используют для создания мощных сварочных источников ($I_{св} \geq 400\text{ А}$), причем, как правило, их устанавливают во вторичном контуре (рис. 1). Массогабаритные характеристики у этих источников существенно выше, чем у сварочных преобразователей третьего поко-

Таблица 1. IGBT модули четвертого поколения серии GR

Ток модуля, А	1700 В (одинарный)	1200 В (одинарный)	1200 В (двойной)	600 В (двойной)
100			MBN100GR12	
150			MBN150GR12	MBN150GR6
200			MBN200GR12	MBN200GR6
300			MBN300GR12	MBN300GR6
400		MBN400GR12		MBN400GR6
600		MBN600GR12		
800	MBN800GR17	MBN800GR12		
1200	MBN1200GR17	MBN800GR12		

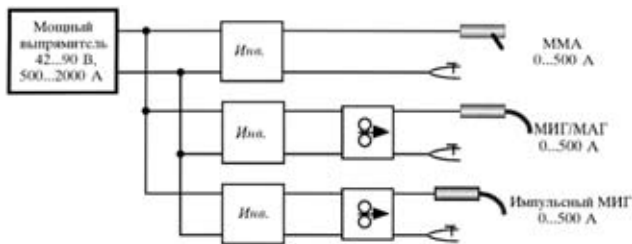


Рис. 2. Многофункциональная сварочно-технологическая система «Magic 500» фирмы «Bester»

ления, однако такова плата за высокие надежность и динамические свойства. Примером интересного технического решения [18] использования чоппер-модулей может служить многофункциональная сварочно-технологическая система фирмы «Bester» (рис. 2). Ее основным элементом является инверторный источник *Инов.* «Magic» с пределами регулирования сварочного тока 0...500 А. Универсальность источника достигается благодаря наличию в нем регулируемых обратных связей по напряжению и току, что позволяет реализовать ВЧП для различных способов сварки. Указанный подход перспективен при создании многопостовых сварочных систем с высокими энергетическими показателями. Описанные этапы эволюции транзисторных ВЧП в основном совпадают с указанными в работе [19]. Отличие состоит только в более подробном анализе третьего этапа, на котором были достигнуты существенные результаты в создании новых типов сварочных ИП. Чтобы определить дальнейшие пути развития и совершенствования СО, необходимо остановиться на анализе последних достижений в области электротехнических материалов, блоков и узлов силовой электроники и микропроцессорной техники, а также ВЧП и управлении ими, связанном с применением алгоритмов на основе фаззилогики и нейросетей.

Именно благодаря прогрессу в силовой электронике, обусловленному появлением различных

Таблица 2. IGBT модули четвертого поколения серии GS

Ток модуля, А	1200 В (одинарный)	1200 В (двойной)	600 В (двойной)	1200 В (шестикратный)	600 В (шестикратный)
75		MBM75GS12AW		MBB75GS12AW	
100		MBM100GS12AW		MBB100GS12AW	
150		MBM150GS12AW	MBM150GS6AW		
200		MBM200GS12AW	MBM200GS6AW		MBM200GS6AW
300	MBN300GS12AW	MBM300GS12AW	MBM300GS6AW		
400	MBN400GS12AW		MBM400GS6AW		
600	MBN600GS12AW		MBM600GS6AW		
1200	MBN1200GS12AW				

Таблица 3. IGBT модули четвертого поколения серии «High power type»

Ток модуля, А	3300 В (одинарный)	2500 В (одинарный)	2000 В (одинарный)	1700 В (одинарный)	3300 В (чоперный)
400	MBN400D33A		MBN400C20		
600	MBN600C33A		MBN600C20		
800					MBL800D33B
1200	MBN1200D33A	MBN1200D25A			
1800				MBN1800D17C	

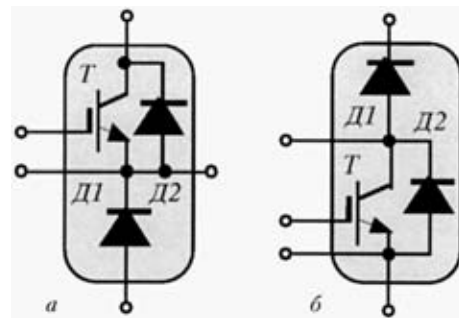


Рис. 3. Схемы чоппер-модулей GAR (а) и GAL (б) типа

типов быстродействующих, надежных и мощных коммутирующих элементов, в последние годы активно проводились исследования и разработки высокочастотных сварочных источников. Достаточно точная, на наш взгляд, градация поколений силовых ключей приведена в работе [17], где отмечается, что широкое использование IGBT и MosFET транзисторов в СО началось в 1990-е годы. Типичное время включения и выключения тока для IGBT ключей составляет соответственно 0,2...0,4 и 0,2...1,5 мкс. Остаточное напряжение на полностью включенном транзисторе, рассчитанном на напряжение 1200 В, не превышает 3,5 В [20]. Это значительно меньше, чем падение напряжения на открытом ключе типа MosFET. Поэтому дальнейшее развитие силовой электроники пошло по пути совершенствования технологии изготовления транзисторов IGBT. Четвертое поколение IGBT модулей фирмы «Hitachi» [21], выполненное на базе планарной технологии с самосовмещением, позволяет уменьшить как статические, так и динамические потери, обеспечить более эффективный теплоотвод и тем самым повысить долговечность и термическую устойчивость изделия.

В IGBT модулях, рассчитанных на напряжение насыщения 1200 В, благодаря новой технологии

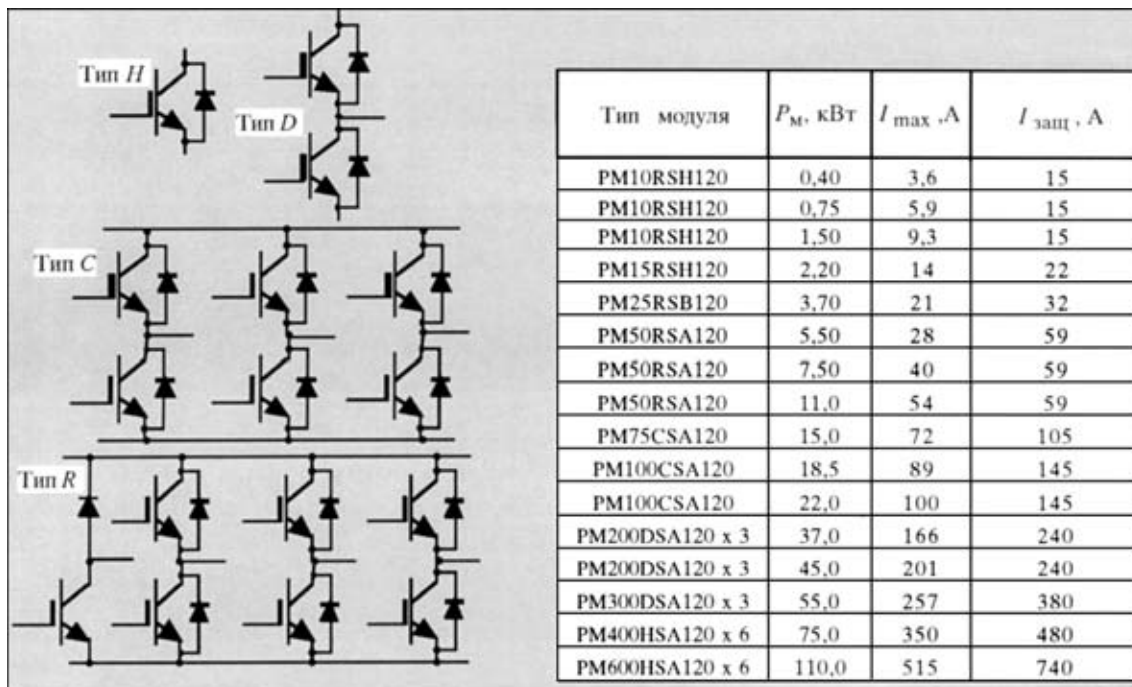


Рис. 4. Силовые блоки различных типов ИСМ и их технические характеристики (P_M — мощность модуля; I_{max} — максимальный ток; $I_{защ}$ — ток защиты)

удалось снизить последнее от 2,2 до 0,5 В, а также уменьшить коммутационные потери на 25%. Одновременно с этим была улучшена работоспособность рекуперативного диода, также уменьшающего потери на переключение. Это позволило создать мощные ключевые элементы на работающих токах до 1200 А при напряжении до 3,3 кВ (табл. 1–3).

Весьма плодотворным направлением для преобразовательной техники является создание чоппер-модулей, представляющих собой единую конструкцию, в которой размещены силовые транзистор T и диод $D1$, а также рекуперационный диод $D2$ (рис. 3). Как будет показано ниже, на их основе можно создавать СО, рассчитанное на токи до 1000 А. В зависимости от конфигурации силовых элементов различают транзисторно-диодные модули (GAR-тип) и диодно-транзисторные (GAL-тип). Благодаря такой компоновке они существенно упрощают процессы монтажа силовых цепей, а также повышают надежность их функционирования.

В последнее десятилетие в силовой электронике наметилась тенденция объединения в одном модуле силовых элементов, схем управления, защиты и диагностики. Поскольку происходит перенос логических функций в структуру модуля, такие устройства получили название интеллектуальных силовых модулей (ИСМ). Их применение позволяет значительно сократить массу и габариты СО при существенном расширении его функциональных возможностей, а также повышении надежности и уменьшении трудоемкости изготовления.

Интеллектуальные силовые модули являются модернизированными гибридными силовыми устройствами, сочетающими высокую скорость переключения и низкие потери транзисторов IGBT со

встроенными схемами управления, защиты и диагностики. Высокая эффективность защиты от перегрузок по току и режиму короткого замыкания достигается благодаря использованию специальных чипов с разделенным эмиттерным переходом, «чувствительным» к току. Принципиальные схемы силовых узлов ИСМ фирмы «Mitsubishi» и их технические характеристики приведены на рис. 4. Более подробно вопросы применения ИСМ рассмотрены в работе [22].

Силовые блоки ВЧП. В технической литературе вопросу создания ВЧП посвящено большое количество статей, монографий и сборников. При проектировании СО используются различные схемы ВЧП [23, 24], причем в основном они выполнены на силовых транзисторах IGBT либо MosFET. Из известных схемных решений применяются однотактные [25], двухтактные [26], полумостовые [27] и мостовые преобразователи [28]. Стремление к улучшению энергетических показателей, а также повышению частоты преобразования привело к созданию резонансных ВЧП [29]. По мнению автора работы [30], этот путь развития ВЧП является наиболее перспективным, поскольку, помимо более высоких КПД и частоты преобразования, он обеспечивает существенно лучшие показатели ЭМС.

Не останавливаясь на всех известных схемотехнических решениях в обширной области преобразовательной техники, рассмотрим более подробно некоторые из них, наиболее пригодные для создания современных образцов СО, упрощенные схемы которых приведены в табл. 4.

Понижающий ШИМ-преобразователь (ПнП). В этом типе преобразователя не используется трансформатор, поэтому отсутствует развязка между входом и выходом. Здесь постоянное входное напряжение преобразуется в более низкое с помощью



Таблица 4. Схематехническое построение силового блока преобразователя

Тип преобразователя	Основные схемы	Рекомендации по выбору силовых ключей
ПнП		Чоппер-модули GAR-типа для MMA сварки и GAL для ТИГ сварки
ПвП		Предпочтительны чоппер-модули GAL-типа
ОМП		Предпочтительны чоппер-модули GAR и GAL-типа
ИДЛ		Можно применять любые типы IGBT и MosFET транзисторов, а также чоппер-модули GAL-типа
ЦКП		Наиболее предпочтительны ИСМ, оснащенные встроенными цепями управления и защиты, например IPM15RSSH120

транзисторного ключа, управляемого ШИМ-модулятором. Такое устройство при введении соответствующих обратных связей является эффективным стабилизатором тока и поэтому может успешно применяться при создании СО для MMA и ТИГ сварки. Особенно перспективны ПнП в качестве отдельных постов многопостовых сварочных систем [31], благодаря чему полностью исключается применение балластных реостатов и тем самым в значительной мере улучшаются параметры энергосбережения. Если для их построения использовать чоппер-модуль GAR-типа, в котором объединены транзистор $T1$ и диоды $D1, D2$, то можно достичь высокой надежности сварочных устройств.

Повышающий ШИМ-преобразователь (ПвП). Это устройство работает подобно описанному выше. Отличие от предыдущего заключается в том, что выходное напряжение в нем выше, чем входное.

В повышающем ШИМ-преобразователе напряжение на дуге равно сумме входного напряжения и напряжения, определяемого коммутацией транзистора $T1$ под управлением ШИМ-модулятора. Указанные свойства ПвП позволяют рекомендовать его для создания автономного СО, например, питаемого от аккумуляторных батарей [32].

Однотактный мостовой преобразователь (ОМП). Схемы однотактных преобразователей на MosFET и IGBT модулях получили широкое распространение при создании аппаратов для дуговой сварки штучными электродами, МИГ/МАГ сварки, а также ТИГ сварки, работающих на токах до 300 А. В более мощных сварочных аппаратах обычно используются схемы мостовых преобразователей, реже полумостовых.

Схема одного из вариантов ОМП, выполненного на базе чоппер-модулей, приведена на рис. 5. Управление силовым блоком осуществляется посредством драйвера IR 2110. Характерной особенностью устройства является возможность рекуперативного сброса энергии в

источник питания с помощью диодов $D1, D3$. Высокая надежность работы такого типа сварочных преобразователей определяется наличием защитных диодов $D2, D4$, а также правильным выбором конструкции сварочного трансформатора [17] и выходного дросселя Dp .

Преобразователи на основе искусственной длинной линии (ИДЛ). Описанным выше схемам присущи серьезные недостатки, связанные с широким диапазоном частот преобразуемых токов и напряжений. Естественно, это приводит к тому, что в результате эксплуатации инверторных ИП генерируется высокий уровень электромагнитных помех, часто превышающий допустимую норму. Поэтому вопросы ЭМС [33, 34] становятся достаточно актуальными. Радикальным путем исключения этого недостатка сварочных преобразователей является переход к резонансным схемам, от-

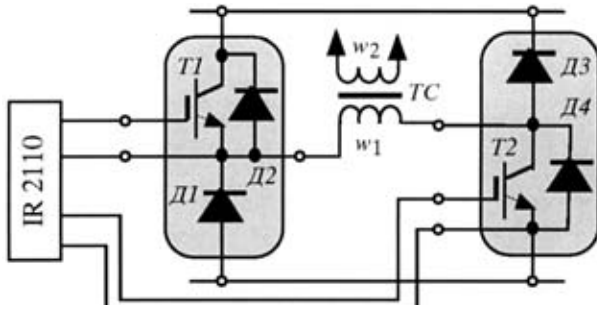


Рис. 5. Схема силовой цепи сварочного ОМП, выполненного на чоппер-модулях

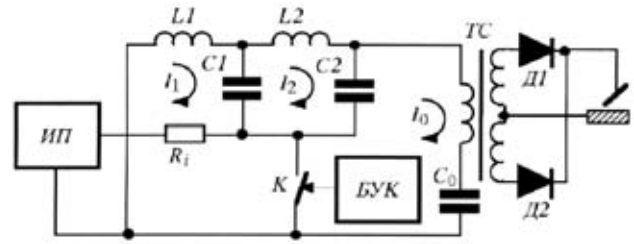


Рис. 7. Преобразователь с синхронной коммутацией элементов ИДЛ: $R_{\text{ист}}$ — сопротивление ИП

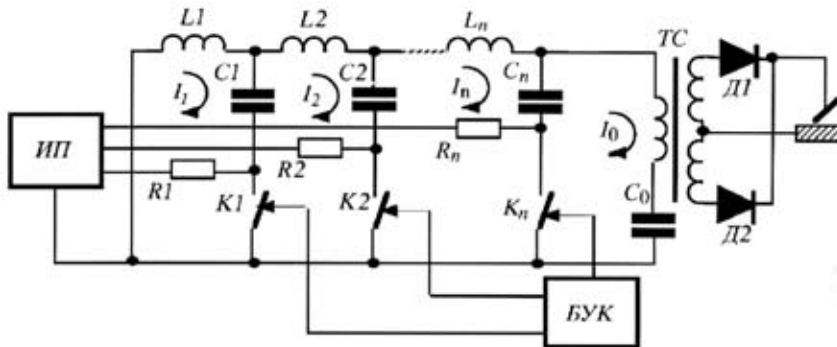


Рис. 6. Схема преобразователя на основе ИДЛ с сосредоточенными параметрами: R_1, \dots, R_n — зарядное сопротивление

личающимся высокими избирательными свойствами [35].

В этой связи нами была предпринята попытка выбора такой схемы преобразователя, в которой бы генерируемые импульсы были по своей форме близки к гармоническим колебаниям, что существенно облегчило решение вопросов ЭМС, а также упрощает процессы коммутации транзисторных ключей. Как известно [36, 37], этому наиболее полно соответствуют преобразователи на основе ИДЛ. Обычно схемы таких преобразователей выполняются на отрезках однородных линий либо на базе линий с сосредоточенными параметрами, один из вариантов которого приведен на рис. 6. Формирующие звенья ИДЛ состоят из n секций $L_j C_j$, которые коммутируются соответствующими ключами K_j . В моменты коммутации в каждой из ячеек начинают формироваться контурные токи I_j , суперпозиция которых определяет выходной ток преобразователя I_0 , а следовательно, и значение выпрямленного сварочного тока. Очевидно, что в этой схеме преобразователя на уровень формируемого импульса существенно влияют моменты включения коммутаторов K_1, \dots, K_n . Различают ИДЛ с одновременной коммутацией — «синхронные линии» и с последовательной коммутацией, в которых работа ключей осуществляется по определенной программе, задаваемой блоком управления коммутацией (БУК).

Анализ переходных процессов в линиях с программной коммутацией достаточно сложен и может быть выполнен с применением численных методов. Поэтому ограничимся рассмотрением только синхронного режима работы ИДЛ, основные расчетные соотношения для которых были получены Вайбелем [38]. Сущность работы такого класса фор-

мирователей ВЧ колебаний основана на избирательных свойствах ИДЛ, выполненных на сосредоточенных элементах (L — индуктивности и C — емкости). Если в линии, представленной на рис. 7, закороченной на одном конце и подключенной к нагрузке (сварочный трансформатор TC) на другом, предварительно зарядить конденсаторы C_1, C_2 до напряжения $ИП$, а затем замкнуть ключ K , то в ней произойдет колебательный переходный процесс. Частота этих колебаний определяется параметрами реактивных элементов L_1, L_2, C_1, C_2 . Следовательно, длительность импульса в первичной обмотке TC будет определяться «электрической длиной» ИДЛ. Если параметры линии выбраны так, что $L_1 = L_2 = L$, а $C_1 = C_2 = C$, то в устройстве будут возбуждаться колебания на частоте, определяемой выражением $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$. Устройство способно генерировать одиночные импульсы, по форме близкие к гармоническим колебаниям, длительность которых составляет $\tau_n = 1/f$. Значения скважности g работы линии не могут быть меньше 2, поскольку они определяются двойным временем прохождения «электрической длины» ИДЛ.

Произведем оценку параметров линии с учетом заданного сварочного тока $I_{\text{св}}$ и частоты ВЧ преобразований f . При работе от промышленной сети 220 В выходное напряжение ИП составляет $U_{\text{max}} = 310$ В. Следовательно, ток первичной обмотки TC должен соответствовать значению $I_0 = I_{\text{св}}/k_{\text{тр}}$ ($k_{\text{тр}}$ — коэффициент трансформации TC , определяемый отношением $U_{\text{max}}/U_{\text{x.x}}$), т. е. можно записать $I_0 = I_{\text{св}} U_{\text{x.x}}/U_{\text{max}}$. Так как в линии формируются импульсы длительностью τ_n и скважностью g , то их энергию можно определить выражением

$$W_n = U_m I_0 \tau_n g = I_{\text{св}} U_{\text{x.x}} \tau_n g. \quad (1)$$

Уровень этой энергии должны обеспечить конденсаторы C_1, C_2 , для которых она определяется известным выражением $W_C = CU_{\text{max}}^2/2$. Для идеальной линии без потерь можно записать

$$\frac{CU_{\text{max}}^2}{2} = I_{\text{св}} U_{\text{x.x}} \tau_n g. \quad (2)$$

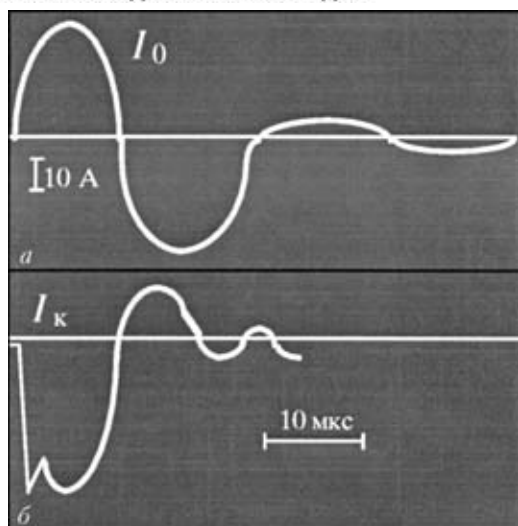


Рис. 8. Осциллограммы токов I_0 (а) и I_k (б)

Отсюда находим емкость конденсатора:

$$C = \frac{2I_{св}g\tau_{и}}{U_{max}k_{гр}} \quad (3)$$

Индуктивность, образующих ИДЛ, определим, подставив в выражение $L = 1/4\pi^2f^2C$ значение емкости C из (3)

$$L = \frac{U_{max}k_{гр}}{8\pi^2f^2I_{св}g\tau_{и}} \quad (4)$$

Нетрудно увидеть, что выражения (3) и (4) полностью описывают структуру сварочного преобразователя, выполненного на базе ИДЛ, и являются основными для его расчета.

В качестве примера рассчитаем элементы модуля ИДЛ, предназначенного для создания сварочного аппарата со следующими характеристиками: рабочая частота составляет 50 кГц; $I_{св} = 120$ А; $U_{max} = 310$ В; $U_{х.х} = 45$ В. Следовательно, коэффициент трансформации равен 6,9, $\tau_{и} = 20$ мкс, а ток в первичной обмотке ТС будет составлять 17,5 А. Если принять $g = 2$, то значения параметров реактивных элементов линии, вычисленные по (3) и (4), соответственно равны $C = 4,5$ мкФ и $L = 23$ мкГн.

Экспериментальную проверку макета сварочного источника, выполненного по схеме, приведенной на рис. 7, проводили с использованием в качестве нагрузки балластного реостата. Значения реактивных элементов соответствовали рас-

считанным выше. Коммутация осуществлялась транзисторным ключом типа Y25120D (фирмы «Motorola»). Для защиты ключа от обратного напряжения применяли диоды КД213. Измерения тока в первичной обмотке ТС I_0 (рис. 8, а) и тока ключа I_k (рис. 8, б) выполняли с помощью широкополосного датчика Холла. На осциллограмме (рис. 8, а) наблюдается наличие небольшой асимметрии положительной и отрицательной полуволны тока I_0 , посему необходимо применять меры для устранения «замагничивания» магнитопровода ТС. На рис. 8, б видно, что амплитуда обратного выброса составляет 25...30 % основного тока. Это значит, что можно использовать диоды с предельным значениями, в 3...4 раза меньше, чем у тока ключа.

Описанный подход, основанный на применении ИДЛ, был положен в основу разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона силового блока сварочного преобразователя «Корал-163» (см. вклейку).

В ряде случаев можно использовать более простые схемы резонансных ВЧП. Одна из них показана на рис. 9. Основу ее составляет так называемый резонансный ключ с естественным режимом коммутации [29]. Устройство представляет собой несколько измененную модель однотактного прямоходового конвертора, в которой традиционный транзисторный коммутатор заменен «резонансным» ключом. Последний состоит из транзистора Т1, диода Д2 и реактивных элементов резонансного контура L_p и C_p . Следует отметить, что в качестве L_p может выступать индуктивность рассеяния ТС.

Сварочное устройство работает следующим образом. Когда Т1 закрыт, а в дросселе $L1$ запасена энергия магнитного поля, в цепи Д4- $L1$ протекает сварочный ток. При открытии ключа Т1 (этот момент определяется драйвером УС 3875) начинает нарастать ток в индуктивности L_p , что приводит к возрастанию тока во вторичной обмотке ТС, при этом значение тока, протекающего через диод Д5, уменьшается, а через Д4 — увеличивается, а напряжение на вторичной обмотке возрастает. Повышение, а затем понижение выходного напряжения ТС происходит по синусоидальному закону, поскольку L_p и C_p образуют резонансный контур. В момент, когда Т1 закрывается, диод Д2 предотвращает протекание обратного тока через ключ. Когда ток в L_p становится равным нулю, сварочный ток протекает по цепи C_p -Д4- $L1$. Эта фаза работы устройства оканчивается полным разрядом C_p и начинает снова работать цепь Д5- $L1$.

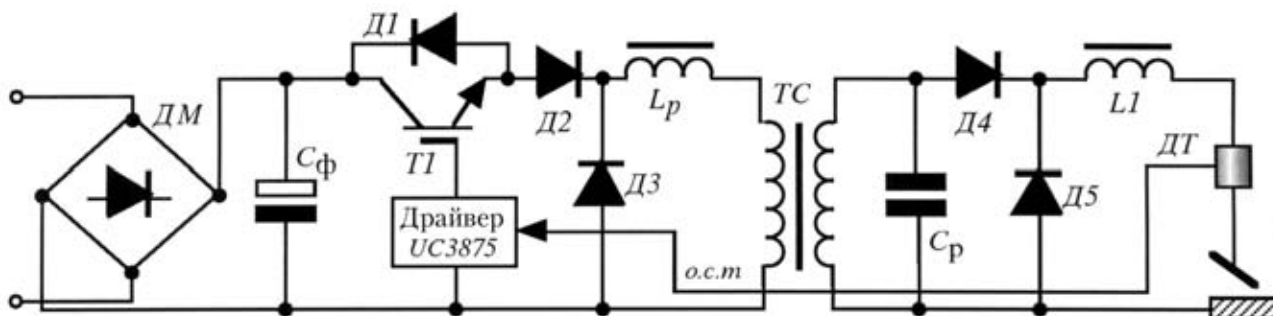


Рис. 9. Упрощенная схема резонансного сварочного ВЧП

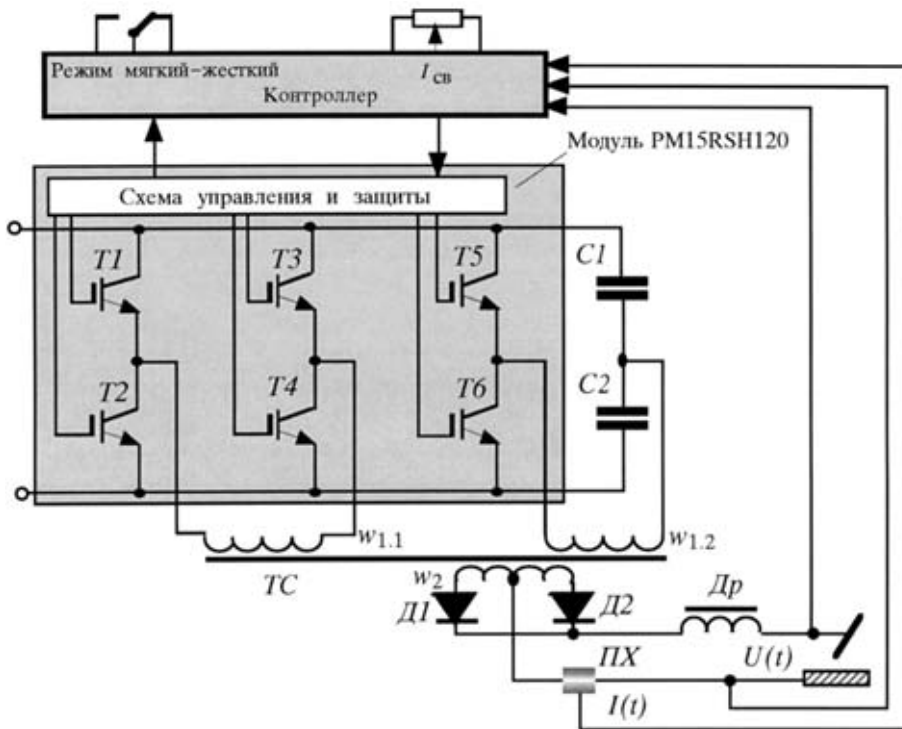


Рис. 10. Сварочный преобразователь комбинированного типа на основе ИСМ PM15RSH120: ПХ — преобразователь Холла

На этом заканчивается первый резонансный цикл, следующий начинается с момента отпираания ключа $T1$. Следовательно, сварочный ток может регулироваться длительностью пауз между резонансными циклами.

Нетрудно увидеть, что устройство достаточно простое по строению, надежное в работе, а также

имеет узкий спектр генерируемых помех. На его основе можно создавать конкурентоспособные коммерческие образцы СО. Преобразователи на основе ИСМ. Как уже отмечалось выше, ИСМ предоставляют разработчикам СО широкие возможности в создании высоконадежных моделей источников для различных способов сварки. Особенно это относится к модулям типа C и R (см. рис. 4). В качестве примера на рис. 10 приведена схема ВЧП с комбинированной внешней характеристикой, выполненного на базе модуля PM15RSH120. Устройство представляет собой двухканальный сварочный источник, состоящий из двух силовых узлов — мостового и полумостового преобразователей. Мостовой преобразователь содержит транзисторные ключи $T1-T4$, диагональ которых включена в первичную обмотку $w_{1.1}$ TC . Полумостовой преобразователь выполнен на транзисторах $T5, T6$, конденсаторах $C1, C2$ и обмотке $w_{1.2}$. Таким образом формируются два управляемых энергетических потока, которые, суммируя, создают во вторичной обмотке w_2 общий сварочный ток. Если

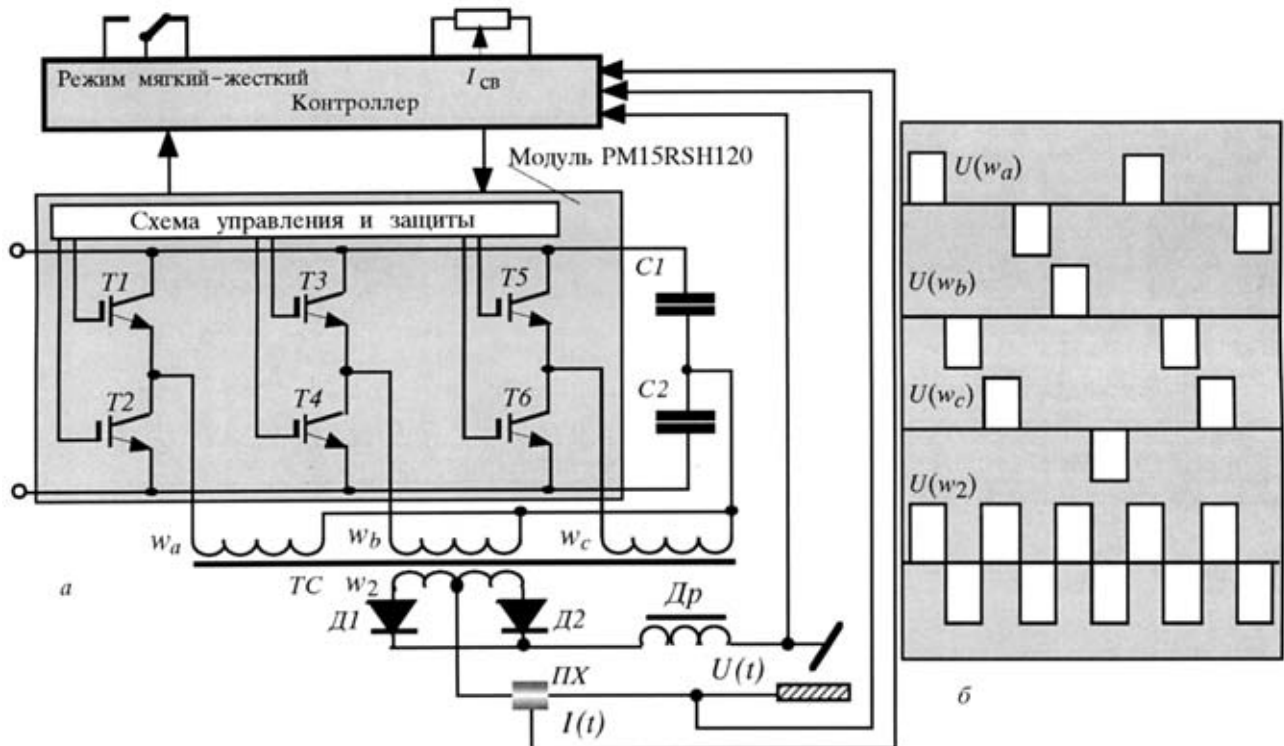


Рис. 11. Циклоконверторный сварочный преобразователь полумостового типа на основе ИСМ 120IPM15 (а) и диаграмма его работы (б): w_a, w_b, w_c и w_2 — обмотки соответственного первичного и вторичного контура

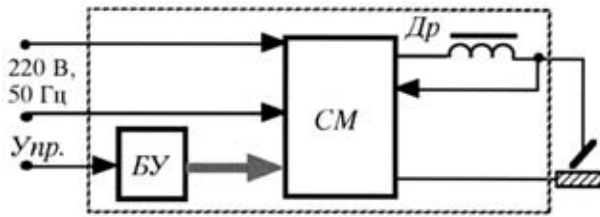


Рис. 12. Структурная схема силового модуля

магнитный поток в $w_{1,1}$ обеспечивает основной сварочный ток, то обмотка w_2 используется для режимов («горячего старта») и модуляции сварочного тока.

Управление сварочным источником осуществляется контроллером, в состав которого входят драйверы TL494. Их режим работы определяется сигналами обратных связей по току и напряжению. Следовательно, в данном устройстве можно формировать круто- и пологопадающую, а также жесткую внешнюю характеристику.

Дефектом ИСМ является недостаточно высокая частота преобразования: по данным работы [22], она составляет не более 20 кГц. Если возникает задача создания сварочного источника с повышенными динамическими параметрами, то можно воспользоваться идеями, которые были положены в основу сварочных *циклоконверторных преобразователей (ЦКП)* [39]. Одна из таких схем ВЧ сварочного конвертора приведена на рис. 11, а. В нем осуществляется фазовое управление ключами модуля PM15RSH120 в соответствии с временными диаграммами, приведенными на рис. 11, б. По сути устройство представляет собой три отдельных полумостовых преобразователя, подключенных к общим конденсаторам $C1$ и $C2$. Если выбрать частоту коммутации каждого полумоста равной 18 кГц, то сварочный ток во вторичной обмотке будет изменяться с частотой 54 кГц.

Описанные схемы далеко не исчерпывают все возможные варианты устройств, которые могут быть выполнены на основе ИСМ. В этом нап-

равлении предстоит еще решить много научных и практических задач.

Модульная организация ВЧП. В настоящее время многие мировые ведущие организации и фирмы уделяют большое внимание исследованиям и разработкам, связанным с созданием многофункционального СО [40–42]. Так, например, фирма «EWM High-Precision Schweisstechnik, GmbH» создала образцы СО модульной конструкции, предназначенные для дуговой сварки плавящимся электродом в инертных и активных газах, при этом возможна сварка штучными электродами. Силовой модуль (СМ) для данного оборудования выпускается в трех модификациях режима — на токи 250, 350 и 500 А. При сварке неплавящимся электродом предусмотрен модуль возбуждения дуги импульсом высокого напряжения. В состав оборудования также входит блок, осуществляющий модуляцию сварочного тока с частотой импульсов 8 кГц.

Фирма «The Lincoln Electric Company» задачу создания многофункционального сварочного источника решает несколько иным способом. В основу подхода положен базовый инвертор с частотой преобразования 20 кГц, режимы работы которого задаются многофункциональным контроллером. С помощью пятипозиционного переключателя можно задавать режимы ручной дуговой сварки штучными электродами, сварки неплавящимся электродом в аргоне, механизированной дуговой сварки в инертных и активных газах, а также сварки порошковой проволокой.

С учетом современных тенденций развития СО, связанных с широким использованием электронных компонентов четвертого поколения, нами предлагается достаточно простой и надежный способ создания многофункционального СО, предполагающий его структурно-модульную реконфигурацию в зависимости от выбранного способа сварки [43]. Отличительной особенностью указанного подхода является возможность его использования в СО при плазменных технологиях, которые требуют повышенного напряжения холостого хода.

В основу построения такого класса СО положен автономный СМ, представленный на рис. 12. Он выполнен на базе ВЧ транзисторного преобразователя*, выходная характеристика которого формируется с помощью блока управления БУ. Таким образом, внешняя характеристика устройства в целом определяется временными параметрами БУ и выходным дросселем Др. Режимы управления устройством Упр. могут задаваться как

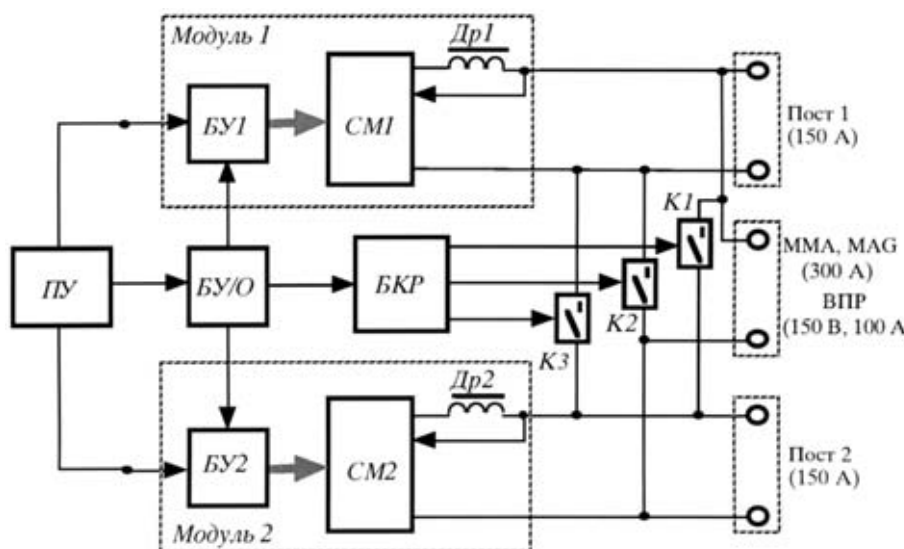


Рис. 13. Схема двухмодульного многофункционального сварочного источника с реконфигурируемой структурой: ВПР — воздушно-плазменная резка

* В настоящей работе авторы использовали ВЧ транзисторные преобразователи фирмы «EP Systems» (Италия), а также модули, выполненные на основе ИДЛ, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона.

Таблица 5. Способы включения модулей

Структурная схема	Состояние		Технологическое применение
	коммутаторов	выходов	
	K1:1 K2:1 K3:0	A:0 B:1 C:0	Параллельное включение (при ММА сварке и механизированной МИГ/МАГ сварке на $I_{св} = 10...300$ А)
	K1:0 K2:0 K3:1	A:0 B:1 C:0	Последовательное включение (при воздушно-плазменной резке на режиме: $U_d = 150$ В; $I_{св} = 100$ А)
	K1:0 K2:0 K3:0	A:1 B:0 C:1	Раздельное включение (при двухпостовой ММА сварке и механизированной МИГ/МАГ сварке на $I_{св} = 5...150$ А)

Примечание. Приведенные данные соответствуют модулю с параметрами $U_{xx} = 75$ В и $I_{св} = 150$ А.

потенциометром, так и встроенным микроконтроллером.

Способы включения модулей по входу и выходу могут различаться в зависимости от решаемой технологической задачи. Если их входные параметры составляют 220 В и 50 Гц, то модули могут подключаться параллельно к однофазной питающей сети (1×220 В). Если количество модулей кратно трем, то предпочтительнее четырехпроводное включение (3×220 В), допускается также трехпроводное подключение к сети (2×220 В). При отсутствии трехфазной питающей сети всегда легко перейти к однофазному питанию входных цепей, что, несомненно, является преимуществом таких источников. Указанное устройство удобно использовать совместно с миниэлектростанциями.

По выходу модули включаются параллельно практически при всех способах дуговой сварки, последовательно — при воздушно-плазменной рез-

ке и периодически по времени — при реализации режима сварки на переменном токе.

Рассмотрим более подробно особенности построения и работы двухмодульного устройства, на базе которого можно создавать различные по конфигурации структурные схемы источников требуемого технологического назначения. В табл. 5 приведены отдельные структурные схемы, а также даны варианты их технологического применения. Практическая реализация всех технологических режимов, указанных в таблице, осуществляется двухмодульным многофункциональным источником, схема которого приведена на рис. 13. В состав устройства входят два идентичных силовых модуля *СМ1* и *СМ2*, с блоками управления *БУ1* и *БУ2*. Последние способны работать как в автономном режиме, так и по командам общего блока управления *БУ/О*, формирующего управляющие сигналы для блока коммутации режимов *БКР*. По его командам, определяющим состояние силовых

коммутирующих элементов *К1*, *К2* и *К3*, с пульта управления задается необходимый технологический режим. Когда все коммутаторы разомкнуты, данное устройство способно работать в режиме двухпостовой сварки с полной развязкой сварочных контуров. При замыкании коммутатора *К3* устройство переходит в режим воздушно-плазменной резки, при котором обеспечивается ток до 100 А.

Существенные трудности возникают в режиме параллельного включения модулей, что связано с тем, что в широких пределах ре-

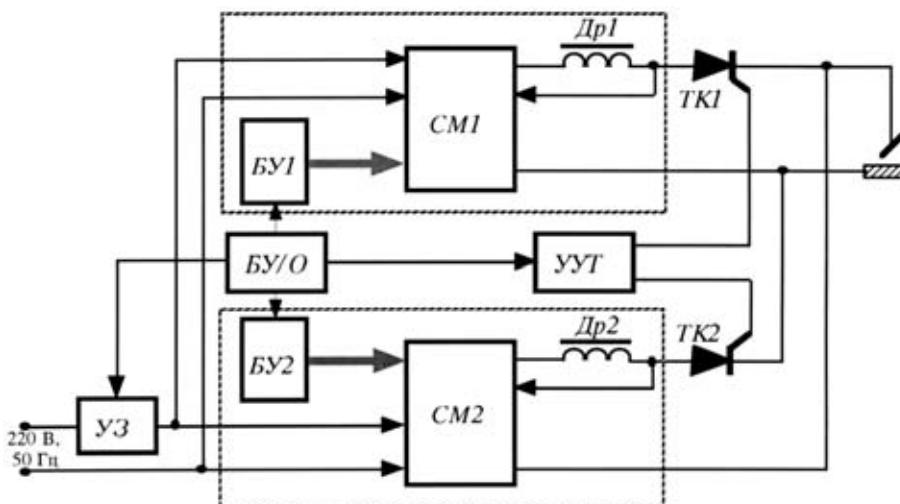


Рис. 14. Вариант структуры сварочного источника в режиме переменного тока

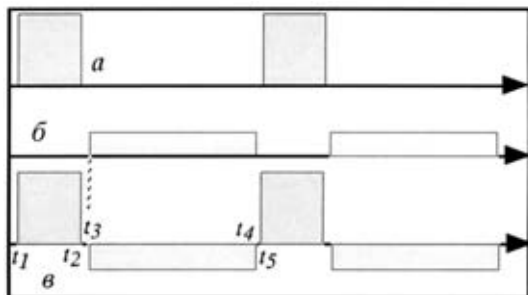


Рис. 15. Временные диаграммы работы устройства: а, б — соответственно импульсы; в — выходной ток источника

гулирования необходимо поддерживать равенство их выходных напряжений с погрешностью не хуже $\leq 5\%$. Это достигается схемой сравнения, которая входит в состав БУ/О. В качестве сигналов обратной связи используются среднеквадратические значения напряжений, действующих на $Dp1$ и $Dp2$.

Описанное устройство при незначительной доработке можно использовать для сварки на переменном токе. Вариант структуры сварочного источника с указанным функциональным назначением показан на рис. 14. Дополнительно в него включены устройство управления тиристорами (УУТ) и два силовых коммутатора $TK1$ и $TK2$, каждый из которых работает соответственно при формировании импульсов положительной и отрицательной полярности сварочного тока.

Алгоритм работы устройства можно объяснить с помощью временных диаграмм, представленных на рис. 15. В момент t_1 по команде БУ1 возбуждается модуль $CM1$ и одновременно открывается тиристорный коммутатор $TK1$. На выходе начинает формироваться импульс сварочного тока при положительной полярности. В момент t_2 сначала выключается $CM1$, а затем запирается $TK1$. Во временном интервале $t_2 - t_3$ на выходе источника отсутствует сварочный ток. Значение этого интервала выбирается из условия необходимого времени для затухания переходных процессов, связанных с коммутацией силовых элементов сварочного источника. В момент t_3 начинается фаза формирования импульса тока при отрицательной полярности. Последовательно запускается $CM2$ и от-

крывается коммутатор $TK2$. Отрицательный импульс сварочного тока прекращается в момент t_4 . В дальнейшем процессы повторяются с установленной оператором периодичностью. Временные интервалы $t_1 - t_2$ и $t_3 - t_4$ задаются с пульта управления и могут устанавливаться в диапазоне 5...500 мс. Амплитуды импульсов тока как при положительной, так и отрицательной полярности устанавливаются независимо в пределах 5...150 А. Таким образом, описанное устройство является достаточно удобным для сварки алюминиевых сплавов и других цветных металлов.

Учитывая современные требования к электромагнитной совместимости, источник снабжен устройством защиты УЗ питающей сети, которое представляет собой комбинированный фильтр нижних и верхних частот. Первый подавляет низкочастотные коммутационные помехи, второй — помехи, создаваемые ВЧП силовых модулей.

При создании модульной структуры сварочного аппарата одним из актуальных вопросов является выбор основного узла — СМ. Если остановиться, например, на стандартных модулях фирмы «EP Systems» типа W100E, W130E и W150E, то, как следует из табл. 6, для двух- и трехмодульных структур сварочного оборудования могут быть достигнуты указанные режимы по сварочному току.

Однако, как показывает опыт, приобретенный при создании таких устройств, предпочтительнее создание специализированного силового модуля, функциональное назначение которого бы наиболее полно соответствовало решаемой задаче. В этой связи нам представляются достаточно перспективными ВЧП, выполненные на основе элементов ИДЛ с синхронной коммутацией (см. рис. 7).

Управление процессом дуговой сварки при использовании ВЧП. Вопросы управления сварочными ВЧП достаточно подробно рассмотрены в работе [17]. Поэтому остановимся лишь на результатах, полученных в последние годы, и не вошедших в нее.

Прежде всего это относится к управлению по методу STT [44], основанному на использовании сил поверхностного натяжения для управляемого каплепереноса при МИГ/МАГ сварке. Этот алгоритм предложен и разработан специалистами фирмы «The Lincoln Electric Company» и имеет адаптивный характер, позволяющий улучшить энергетические показатели сварки, а также, что очень важно, резко сократить количество разбрызгиваемого металла.

Значительные успехи достигнуты при использовании алгоритмов, основанных на теории нечетких множеств [45] — так называемых фаззи-алгоритмах. Концепция на основе нечетких алгоритмов базируется на том, что правильно разработанный алгоритм управления работает аналогично высококвалифицированному сварщику [46]. Это значит, что от одного процесса сварки к другому он повышает качество своего функционирования, а следовательно, и получаемых сварных соединений, поскольку в нем заложен процесс самообучения. Иными словами, источники с такой сис-

Таблица 6. Варианты модульных структур

Продолжительность нагрузки, %	Сварочный ток, А	Двухмодульная структура	Трехмодульная структура
W100E			
100	60	120	180
60	80	160	240
35	100	200	300
W130E			
100	85	170	255
60	100	200	300
35	130	260	390
W150E			
100	100	200	300
60	120	240	360
35	150	300	450

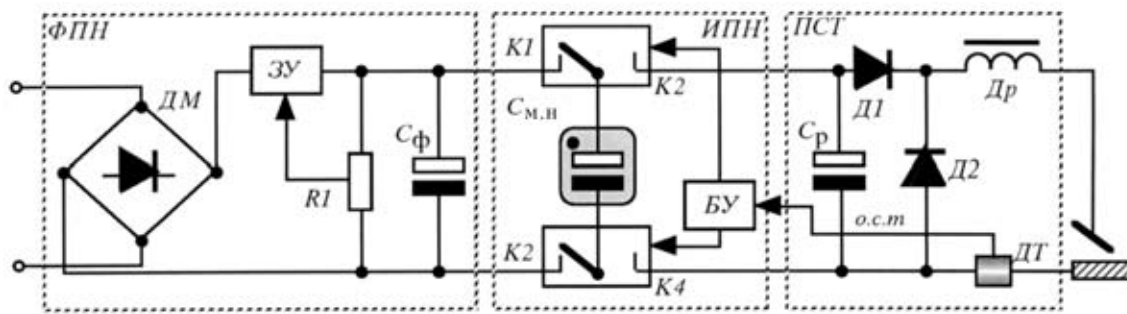


Рис. 16. Бестрансформаторный сварочный ВЧП

темой управления имеют обратную связь по качеству исполнения сварных соединений.

Некоторые авторы [47, 48] ведут поиск оптимальных алгоритмов на основе нейросетевых подходов. Способности к обучению нейронных сетей аналогичны способностям квалифицированного сварщика, что позволяет использовать для оперативного управления сварочным процессом. Указанные сети [48] пригодны для управления глубиной проплавления при сварке тонколистовых материалов, отслеживания зазора и траектории сварки и управления перемещением горелки по ней, а также для построения математической модели ванны с целью расчета оптимального режима сварки. Возможны комбинированные подходы, когда используются одновременно нейроалгоритмы на основе нечеткой логики.

Уже сейчас описанные выше алгоритмы, основанные на методах искусственного интеллекта (ИИ), приводят к совершенно новым результатам в плане обеспечения высокого качества сварных соединений. Учитывая непрерывное совершенствование микроконтроллерных систем и рост их производительности, можно с уверенностью утверждать, что методы ИИ будут успешно внедряться в СО, повышая его качество и надежность.

Внешний вид и технические характеристики образцов сварочных ВЧП, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона, в которых заложены указанные выше принципы, приведены на вклейке.

Перспективы развития оборудования для дуговой сварки на основе транзисторных ВЧП.

На основании приведенных выше сведений о работе в области сварочных ВЧП, выполненной в ИЭС им. Е. О. Патона за последние пять лет, а также анализа современных тенденций развития СО на базе ВЧП, можно говорить о широком применении высоконадежных силовых коммутаторов третьего и четвертого поколений, оснащенных средствами встроенного интеллекта. Появились новые схемотехнические решения силовых узлов, отличающиеся высокими КПД и коэффициентом мощности. Их системы управления выполнены на основе микроконтроллеров, которые реализуют адаптивные алгоритмы, например STT, а также ведутся работы по использованию алгоритмов на основе ИИ. Основными направлениями будущих исследований могут быть следующие.

По всей видимости, ведущие фирмы, производители СО, продолжают свои работы, связанные с поиском и совершенствованием новых решений

схем силовых узлов ВЧП сварочного тока применительно к различным способам дуговой сварки. Исследования будут направлены на повышение КПД и коэффициента мощности, расширение температурного диапазона работы в пределах ($-40...+50$ °С), повышение надежности (наработка на отказ должна составлять не менее 5 тыс. ч), снижение уровня электромагнитных помех в соответствии с нормами европейских и мировых стандартов. Следовательно, есть основания предполагать, что дальнейшее развитие получат резонансные методы преобразования сварочного тока, которые позволят существенно увеличить рабочую частоту силовых модулей [49]. Это приведет к дальнейшему уменьшению массогабаритных характеристик. Если использовать такой показатель, как отношение массы сварочного аппарата к максимальному току, то очевидно он будет равен $0,01...0,015$ кг/А, т. е. инвертор на ток до 150 А по массе будет составлять 1,5... 2,0 кг. Для источников, работающих при очень низких (до -50 °С) температурах, могут быть рекомендованы способы синхронного силового выпрямления сварочного тока [16], исключая применение высокоемких конденсаторов с оксидным диэлектриком, не способных работать при указанных температурах. На базе достижений последних лет в области создания молекулярных накопителей [50] могут получить развитие способы бестрансформаторного преобразования сварочного тока [51]. Гипотетическая схема такого сварочного источника приведена на рис. 16. Источник состоит из трех основных узлов: формирователя постоянного напряжения (ФПН), импульсного преобразователя напряжения (ИПН) и преобразователя сварочного тока (ПСТ). В состав ФПН входит выпрямитель ДМ, зарядное устройство (ЗУ), уровень срабатывания которого задается потенциометром R1 и фильтрующий конденсатор С_Ф. Импульсный преобразователь напряжения состоит из молекулярного накопителя С_{м.н} и блока ключей К1–К4, алгоритм коммутации которых задается БУ. Режим функционирования последнего определяется сигналом обратной связи по сварочному току о.с.т. В ИПН реализуется известный режим «летающего» конденсатора, с помощью которого обеспечивается квазигальваническая развязка между входным контуром и сварочной цепью. Работа блока ПСТ аналогична работе преобразователя, понижающего напряжения (см. табл. 2), поэтому ее описание мы не приводим.



Методы конструирования сварочных ВЧП претерпят существенные изменения. Например, узлы сварочных трансформаторов будут выполняться на платах печатного монтажа рядом с электронными блоками, что позволит устранить влияние на работу устройства паразитных параметров. При этом витки первичной обмотки могут быть выполнены травлением на самой плате, а вторичной, более мощной, — с применением технологии напыления на изолирующей прокладке. Магнитопроводы таких трансформаторов также могут быть созданы путем напыления порошка аморфного железа.

Будет осуществляться дальнейшая интеллектуализация СО на основе широкого применения однокристалльных ЭВМ с вычислительным ресурсом и производительностью, равными современным персональным компьютерам. В ряде случаев могут использоваться спецпроцессоры. В области программного обеспечения ожидается появление интегрированных сред и экспертных систем для различных способов сварки, ориентированных на применение алгоритмов ИИ.

Конкуренция в области сбыта СО потребует решения вопросов повышения его надежности. Выполнение этих задач может быть обеспечено за счет не только конструкторских решений и выбора щадящих режимов функционирования силовых узлов, но и резервирования наиболее критичных элементов, а также создания средств диагностического обеспечения [52]. В этой связи модульные сварочные аппараты получают дальнейшее развитие.

Больших перемен следует ожидать в сервисном обеспечении СО. Будут созданы новые устройства дистанционного контроля и управления источниками сварочного тока на основе радиоканала [53, 54]. Возможно, будут внедрены устройства речевого ввода команд управления режимами сварки.

Для повышения уровня электробезопасности СО уже созданы и внедрены детекторы тока утечки [55], с помощью которых в критических режимах обесточиваются силовые цепи. Особенно значима роль таких датчиков тока при использовании бестрансформаторных схем.

Таким образом, современный сварочный аппарат с ВЧП на 90 % представляет собой интеллектуальное электронное устройство. Компоненты электротехнической промышленности составляют от 5 до 10 %. Поэтому неудивительно, что ведущие фирмы в области силовой электроники, такие, как «Panasonic», «Hitachi», «Kawasaki» и др., составляют сейчас серьезную и все возрастающую конкуренцию на мировом рынке СО. Если сейчас ими успешно заполнена ниша источников для различных способов дуговой сварки, рассчитанных на токи до 500 А, работающих при нормальных условиях, то надо полагать, что они ведут разработки СО на токи 1000 А и более, а также для работы при низких (до -40°C) температурах и эксплуатации в тропических условиях. Тенденция развития электроники и успехи в области создания новых материалов, например, аморфное железо, свидетельствуют о том, что эти задачи будут решены в ближайшем будущем.

1. *Лебедев В. К.* Тенденции развития источников питания для дуговой сварки // Автомат. сварка. — 1995. — № 5. — С. 3–6.
2. *Источники питания для дуговой сварки с использованием инверторов (Обзор)* / И. В. Пентегов, С. Н. Мецерак, В. А. Кучеренко и др. // Там же. — 1982. — № 7. — С. 29–35.
3. *Carroll E., Klaka S., Linder S.* Тиристоры IGCT. Новый подход к сверхмощной электронике // Электротехника. — 1998. — № 7. — С. 46–53.
4. *Грехов И. В.* Основные принципы построения мощных импульсных и высокочастотных генераторов на основе реверсивно включаемых динисторов // Там же. — 1991. — № 11. — С. 26–29.
5. *Патон Б. Е., Лебедев В. К.* Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. — М.: Машиностроение, 1966. — 360 с.
6. *Пилинский В. В.* Источники вторичного электропитания с бестрансформаторным входом для электронной аппаратуры. — Киев: КПИ, 1985. — 104 с.
7. *Иоффе Ю. Е., Можайский В. А.* Универсальный сварочный инверторный источник общего назначения Inverter V300-1 // Свароч. пр-во. — 1998. — № 1. — С. 44–46.
8. *Патон Б. Е., Лебедев А. В.* Управление плавлением и переносом электродного металла при сварке в углекислом газе // Автомат. сварка. — 1988. — № 11. — С. 1–5.
9. *SELCO: General Catalog.* — 2001. — 16 с.
10. *STEL: General Catalog.* — 2002. — 40 с.
11. *CEBORA: Interter TIG DC.* — 2001. — 20 с.
12. *CLOOS: Innovation aus — Tradition.* — 2001. — 28 с.
13. *KEMPPPI: Schweißmaschinen Mig-Bunner, Wig-Bunner.* Austrues Eng. Roboter. — 2001. — 85 s.
14. *Fume Generation in Al-Mg alloy welding with AC-pulsed GMA welding method* / M. Ushio, K. Nakata, M. Tanaka, et al. // Trans. JWRI. — 1994. — 23, № 1. — P. 21–26.
15. *Progresso dellaqualita e dellaproduttivita nella saldatura di lamiere sottili con il procedimento MIG pulsato in corrente alternata* / S. Hadara, H. Tong, T. Ueyama, M. Ushio // Rivista Italiana Della Saldatura. — 2001. — № 4. — P. 453–459.
16. *Рудык С. Д., Турчианов В. Е., Флоренцев С. Н.* Перспективные источники сварочного тока // Электротехника. — 1998. — № 7. — С. 8–13.
17. *Схемотехника инверторных источников питания для дуговой сварки* / Е. Н. Верещаго, В. Ф. Квасницкий, Л. Н. Мирошниченко, И. В. Пентегов. — Николаев: УГМТУ, 2000. — 284 с.
18. *BESTER: Product Catalog.* — 2001. — 16 s.
19. *Kaulich G., Killing R.* Entwicklung der Schweißstromquellen zum Lichtbogenschweissen // Praktiker. — 2000. — № 12. — S. 458–461.
20. *Флоренцев С. Н., Савкин А. И.* Гибридные силовые интегральные схемы и модули // Электроника. — 1991. — № 6. — С. 5–9.
21. *Накано Э.* Новые IGBT-модули фирмы Hitachi // Chip News. — 2000. — № 1. — С. 21–24.
22. *Руководство по применению биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и интеллектуальных силовых модулей (IPM) третьего поколения* / Под ред. В. А. Павловского. — Киев, 1997. — 143 с.
23. *Высокочастотные транзисторные преобразователи* / Э. М. Ромаш, Ю. И. Драбович, Н. Н. Юрченко, П. Н. Шевченко. — М.: Радио и связь, 1988. — 288 с.
24. *Маллетт Ч.* Рекомендации по применению модульных преобразователей постоянного тока // Электроника. — 1992. — № 3–4. — С. 86–92.
25. *Поликарпов А. Г., Сергиенко Е. Ф.* Однотактные преобразователи напряжения в устройствах электропитания РЭА. — М.: Радио и связь, 1989. — 160 с.
26. *Кобзев А. В., Михальченко Г. Я., Музыченко Н. М.* Модуляционные источники питания РЭА. — Томск: Радио и связь, 1990. — 336 с.
27. *Бас А. А., Миловзоров В. П., Мусолин А. К.* Источники вторичного электропитания с бестрансформаторным входом. — М.: Радио и связь, 1987. — 160 с.
28. *Функциональные устройства систем электропитания наземной РЭА* / Под ред. В. Г. Костинова. — М.: Радио и связь, 1990. — 192 с.
29. *Иванов-Пыганов А. И.* Электропреобразовательные устройства РЭС. — М.: Высш. шк., 1991. — 272 с.
30. *Ли Ф. К.* Будущее — за резонансными источниками питания // Электроника. — 1990. — № 2. — С. 71–72.
31. *Букин П. Я., Донской А. В.* Многопостовые сварочные системы. — Л.: Судостроение, 1985. — 228 с.

32. Патон Б. Е., Дудко Д. А., Коротынский А. Е. Источники питания на основе аккумуляторов для дуговой сварки // Автомат. сварка. — 1999. — № 1. — С. 29–34.
33. Lucas W. Electromagnetic emission from dc and ac TIG welding system // Welding & Metal Fabr. — 1995. — № 7. — P. 261–265.
34. Анисимов Я. Ф., Васильев Е. П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. — Л.: Судостроение, 1990. — 264 с.
35. Korotynsky A. E. Peculiarities of operation of high-frequency welding inverters on the basis of an artificial long line // The Paton Welding J. — 1999. — № 1. — P. 76–77.
36. Лиетти А. Передающие линии с сосредоточенными параметрами как импульсные генераторы синусоидальных колебаний очень большой мощности // Приборы для научных исследований. — 1969. — № 3. — С. 78–87.
37. Справочник по импульсной технике / Под ред. В. Н. Яковлева. — Киев: Техніка, 1971. — 656 с.
38. Вайбель. Генератор ВЧ-импульсов большой мощности // Приборы для научных исследований. — 1964. — № 2. — С. 27–29.
39. Гелендзе М. Н. Сварочные циклоконвертеры и индуктивно-емкостные преобразователи: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 1988. — 33 с.
40. Dzelnitzki D. Modulare Mehrprozess — Strmquellen ermoglichen verschiedene schweissverfahren // Maschinenmarkt. — 1997. — 103, № 51. — S. 24–27.
41. Kombiniert primar und sekubdar getakte, computergesteuerte Schweisstromquelle mit hoher Dynamik / H. Mecke, W. Fischer, I. Merfert et al. // Schweissen und Schneiden. — 1998. — № 4. — S. 224–228.
42. Инверторный многофункциональный модуль для электропитания сварочной дуги / Е. Н. Верещаго, В. Ф. Квасницкий, В. А. Бирик, В. Ф. Дымов // Автомат. сварка. — 1999. — № 11. — С. 29–33.
43. Paton B. E., Korotynskij A. E. Wielozadaniowe urzadzenie spawalnicze o przekształcalnej strukturze // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach. — 1999. — № 5. — S. 33–35.
44. Квасов Ф. В. Особенности механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла // Свароч. пр-во. — 1999. — № 8. — С. 27–31.
45. Herold H., Neubert G., Puder F. FUSSY — eine vielversprechende Methode zur Fehleruberwachung warend des Schweissens // DVS. — 1994. — № 170. — S. 40–44.
46. Rehfeldt D., Schmitz Th. Fuzzy logic in monitoring of arc welding // Proc. of the Intern. conf. «Joining of materials». — Denmark, 1995. — P. 477–486.
47. Гладков Э. А. Задачи прогнозирования качества и управления формированием шва в процессе сварки с использованием нейросетевых моделей // Свароч. пр-во. — 1996. — № 10. — С. 36–41.
48. Fakuda T., Shibata T. Theory and application of neural networks for industrial control system // IEEE. — 1992. — 39, № 6. — P. 472–489.
49. Сварка и родственные технологии на выставке в Эссене // Автомат. сварка. — 2002. — № 1. — С. 29–44.
50. Иванов А. М., Герасимова А. Ф. Молекулярные накопители электрической энергии на основе двойного электрического слоя // Электричество. — 1991. — № 8. — С. 16–19.
51. А. с. 1614010 СССР, МКП³ G 05 F 1/ 56. Бестрансформаторный стабилизированный источник питания / П. М. Сопрунюк, Л. Е. Ващенко, В. Е. Корепанов, О. А. Червинка. — Оpubл. 15. 12. 90; Бюл. № 46.
52. Коротынский А. Е. Функциональная и тестовая диагностика сварочного оборудования // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 47–50.
53. Гребенко Ю., Шукки А. Радиоканальная система дистанционного контроля состояния // Chip News. — 2001. — № 4. — С. 48–49.
54. Яблоков Д. Модули радиоканала фирмы «Telecontrolli» // Ibid. — 2001. — № 5. — С. 36–37.
55. Кириленко В. А. Детектор тока утечки // Ibid. — № 6. — С. 54–56.

The paper deals with the main evolutionary stages of high-frequency welding converters based on power thyristorized switchboards. It is shown that the main successes in development of this type of welding equipment are chiefly related to achievements in the field of power electronics. New types of power modules based on structure distributions and cycloconverter circuits are described. Methods for further improvement and development of high-frequency welding sources are outlined.

Поступила в редакцию 12.04.2002