

# Методы регулирования и стабилизации тока

## нагрузки сварочных инверторов

**Статья представляет собой обзор публикаций, посвященных особенностям организации управления током нагрузки сварочных выпрямителей инверторного типа с учетом специфики различных сварочных процессов.**

**Сергей Петров**

x9999x@yandex.ru

При разработке источника сварочного тока инверторного типа (ИИСТ) возникает естественный вопрос о выборе способа регулирования и стабилизации тока нагрузки — сварочной дуги. Оптимальный способ регулирования тока ИИСТ должен соответствовать ряду основных требований, отражающих специфику источников сварочного тока:

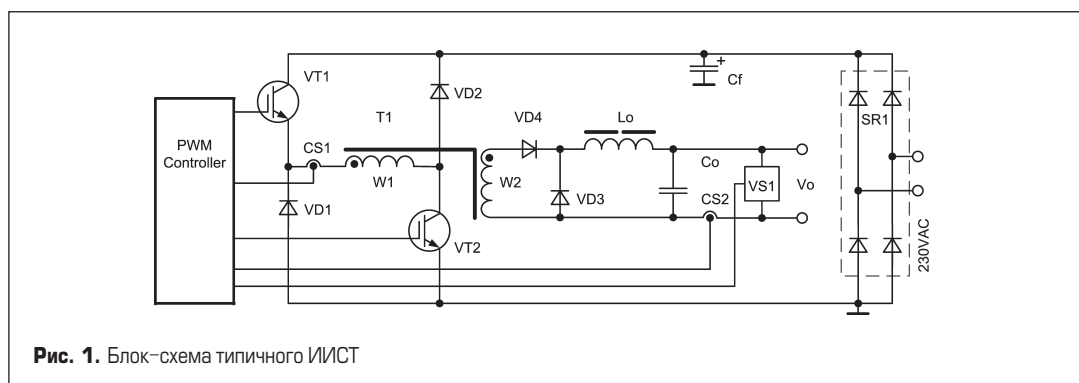
- формировать статическую вольт-амперную нагрузочную характеристику (ВАХ) нужного вида;
- учитывать динамические особенности поведения нагрузки при тех сварочных процессах, для которых предназначен данный ИИСТ;
- представлять собой надежное, технологичное и экономичное решение;
- обеспечивать дополнительные сервисные функции, повышающие качество сварного соединения.

В промышленных ИИСТ, как правило, используется двухпетлевая ООС по току и напряжению на нагрузке для формирования ВАХ нужного вида и реализации дополнительных «сварочных» функций инвертора. Так как основным выходным параметром ИИСТ является ток нагрузки, то далее мы обсудим способы регулирования именно этого параметра. Обычно применяется два способа регулирования: по среднему значению тока нагрузки или по мгновенному (импульсному) значению тока силового транзистора либо первичной обмотки силового трансформатора, то есть по мгновенному значению тока нагрузки, приведенному к первичной обмотке. В первом случае в качестве датчика тока естественно использовать резистивный шунт или датчик, ос-

нованный на эффекте Холла, — трансдюсер (transducer), включенный в цепь нагрузки. Во втором случае применяется простое, надежное и экономичное решение в виде трансформатора тока на кольцевом ферритовом магнитопроводе в цепи первичной обмотки силового трансформатора.

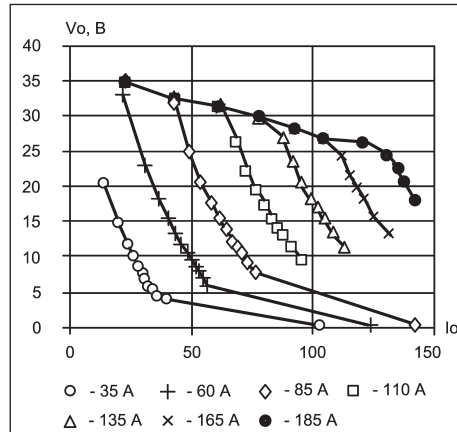
Упрощенная блок-схема типичного ИИСТ для случая регулирования по среднему току нагрузки показана на рис. 1. Датчики тока CS1 и CS2 служат для измерения мгновенного тока первичной обмотки силового трансформатора T1 и среднего тока нагрузки соответственно, датчик VS1 измеряет напряжение на выходе ИИСТ. Датчик CS1 используют для организации защиты ключей VT1, VT2 от перегрузки. В ИИСТ с регулированием по мгновенному току первичной обмотки датчик CS2 не применяют, а в простейших ИИСТ не используется и VS1. О назначении конденсатора  $C_0$  будет рассказано дальше.

Согласованный выбор способа регулирования, топологии силовой части и соответствующего датчика тока во многом зависит от ценовой группы, в которую должен попасть разрабатываемый ИИСТ, и его функциональной насыщенности. В «бюджетных» ИИСТ не применяются дорогостоящие трансдюсеры и, как правило, используется регулирование по мгновенному току ключа. ИИСТ с такой структурой блока управления (БУ) выпускает большое количество производителей. Они представляют собой оборудование бытового или полупрофессионального назначения. Типичными представителями являются широко распространенные на российском рынке сварочные инверторы фирм Telwin, GYS, Cernot



и ряда других. В ИИСТ профессионального уровня применяется регулирование по среднему значению тока нагрузки и используется обратная связь по напряжению на нагрузке, что позволяет сформировать статическую ВАХ практически любого вида и реализовать дополнительные сервисные функции. Датчик тока в виде резистивного шунта используют в своих изделиях фирмы ESAB, НПП «ТехноТрон», НПП «ФЕБ» и другие. Трансдюсеры широко применяют такие мировые лидеры, как Miller Electric, Lincoln Electric и Thermadyne. В промышленных ИИСТ сегодня преимущественно используется силовая часть с топологией однотактного прямоходового мостового конвертера (ОПМК), который показан на рис. 1, либо полномостового конвертера [1]. Очевидно, что использование регулирования по мгновенному току первичной обмотки совместно с топологией силовой части ОПМК позволяет построить максимально простой и недорогой сварочный инвертор. Наличие трансформатора тока в цепи первичной обмотки дает возможность использовать его и для организации защиты силовых транзисторов от перегрузки без введения в схему ИИСТ дополнительных элементов. В связи с этим возникает практическая потребность проанализировать сравнительные достоинства и недостатки этих двух способов регулирования тока нагрузки ИИСТ.

Искажения статической ВАХ ИИСТ при регулировании по мгновенному току первичной обмотки (косвенный способ измерения тока нагрузки) исследовали авторы [2]. На рис. 2 показано семейство статических ВАХ сварочного инвертора мостового типа с регулированием по мгновенному току первичной обмотки (в зарубежной литературе — pick-current mode control), эти характеристики получены экспериментально для нескольких значений тока задания. Следует отметить, что данный метод регулирования в двухтактных преобразователях может приводить к несимметричному перемагничиванию и, как следствие, к динамическому насыщению магнитопровода силового трансформатора. Поэтому регулирование по мгновенному току первичной обмотки естественно использовать в ИИСТ с однотактной топологией силовой части. При анализе рис. 2 ясно, что нагрузочная характеристика исследованного ИИСТ существенно отличается от ВАХ «идеального» источника тока: все кривые смещены в область меньших, по отношению к заданию, токов; падающий



**Рис. 2.** Экспериментальные статические ВАХ мостового ИИСТ для нескольких значений тока задания при регулировании по пиковому току силового транзистора [2]

участок ВАХ не вертикален, и ток короткого замыкания существенно больше тока задания.

Авторы выделяют три причины возникновения сдвига ВАХ в область меньших токов:

1. Сдвиг из-за наличия ненулевых пульсаций тока выходного дросселя:

$$\Delta I_1 = \frac{I_{out\_pick} - I_{out\_avg}}{n} = \frac{\Delta I_{out}}{n}, \quad (1)$$

где  $I_{out\_pick}$  и  $I_{out\_avg}$  — амплитудное и среднее значение тока выходного дросселя соответственно,  $n$  — коэффициент трансформации силового трансформатора. Из (1) видно, что с уменьшением сварочного тока погрешность формирования ВАХ увеличивается из-за роста пульсаций тока нагрузки.

2. В ряде случаев к опорному сигналу  $I_{ref}$  ШИМ-контроллера добавляется компенсирующий сигнал «пилю» от задающего генератора для исключения неустойчивой работы преобразователя при  $D$ , близких к  $D_{max} = 0,5$ . Это тоже приводит к сдвигу ВАХ:

$$\Delta I_2 = I_{ref} - I_{ref}^{ramp} = \Delta I_{ref} D, \quad (2)$$

где  $I_{ref}$  — ток задания,  $I_{ref}^{ramp}$  — ток задания с учетом добавления «пилю»,  $D$  — коэффициент заполнения управляющих импульсов на выходе ШИМ-контроллера.

На практике компенсирующий сигнал обычно суммируется не с опорным сигналом, а с сигналом от датчика тока нагрузки. Кроме того, вместо тока задания и приведенного тока нагрузки на входы компаратора тока ШИМ-

контроллера подаются соответствующие напряжения, в частности при использовании в качестве ШИМ-контроллера популярных микросхем серии UC384х.

3. Сдвиг из-за ненулевого тока намагничивания силового трансформатора  $I_\mu$ , вклад от которого присутствует в ток первичной обмотки:

$$\Delta I_3 = \frac{V_{dc}}{L_\mu} t_{on} = \Delta I_\mu^{max} D, \quad (3)$$

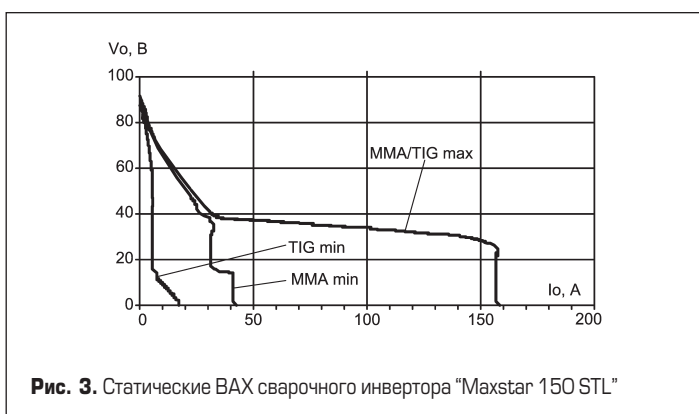
где  $V_{dc}$  — напряжение питания конвертера,  $L_\mu$  — индуктивность намагничивания силового трансформатора,

$$\Delta I_\mu^{max} = \frac{V_{dc}}{L_\mu} T_{sw}$$

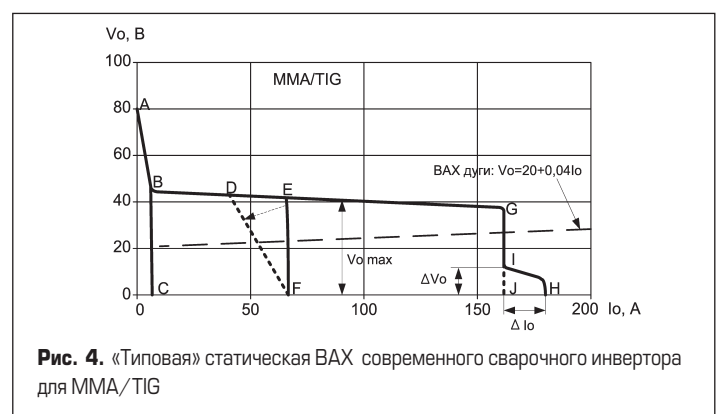
( $T_{sw}$  — период преобразования конвертера). Из (2) и (3) видно, что влияние на ВАХ тока намагничивания и введения компенсационного сигнала качественно одинаково.

4. Сдвиг тока короткого замыкания в сторону больших токов. При коротком замыкании нагрузки (КЗ) ток нагрузки определяется, в основном, минимальной длительностью проводящего состояния силовых транзисторов и суммарными активными потерями в схеме. Из-за конечного быстродействия ШИМ-контроллера, драйверов силовых транзисторов и наличия у последних задержки на выключение не удается сформировать импульсы управления ключами меньше некоторой определенной длительности. Минимальная длительность импульсов управления составляет величину порядка времени задержки между моментом, когда ШИМ-контроллер «определил», что ток первичной обмотки достиг величины тока задания, и моментом спада напряжения на вторичной обмотке силового трансформатора. Характерная величина этой задержки составляет сотни наносекунд. При КЗ ИИСТ переходит фактически в режим нерегулируемого импульсного преобразователя с нагрузочной характеристикой источника напряжения. Авторами цитируемой работы был предложен и реализован на опытном ИИСТ способ коррекции статической ВАХ сварочного инвертора с управлением по мгновенному току первичной обмотки. Пульсации тока нагрузки равны:

$$\Delta I_{out} = (V_{arc}/L_{out}) t_{off} = V_{arc}/L_{out} (0,5 - D) T_{sw}, \quad (4)$$



**Рис. 3.** Статические ВАХ сварочного инвертора «Maxstar 150 STL»



**Рис. 4.** «Типовая» статическая ВАХ современного сварочного инвертора для MMA/TIG

где  $V_{arc}$  — напряжение на дуге,  $L_{out}$  — индуктивность выходного дросселя,  $t_{off}$  — длительность закрытого состояния силовых транзисторов преобразователя. Вольт-амперная характеристика дуги описывается известным эмпирическим соотношением:

$$V_{arc} = 20V + 0,04I_{out} \quad (5)$$

Таким образом, для любой точки ВАХ сварочного инвертора можно рассчитать пульсации тока нагрузки и учесть их в виде поправки к току задания. Удобно использовать микроконтроллер для формирования задания для ШИМ-контроллера, в этом случае массив поправочных коэффициентов сохраняется в ПЗУ микроконтроллера. Компенсацию смещения ВАХ из-за существования сдвига  $\Delta_2$  и  $\Delta_3$  можно реализовать добавкой к току задания  $I_{ref}$  величины  $(\Delta I_{ref} + \Delta I_{\mu}^{max}) D$ . Этот компенсирующий сигнал несложно получить из управляющих импульсов на выходе ШИМ-контроллера, пропустив их через фильтр НЧ с последующим масштабированием до нужного уровня.

В результате описанной коррекции ВАХ опытного ИИСТ существенно приблизилась к ВАХ источника тока, сдвиг в область меньших токов был практически скомпенсирован. Разумеется, «выбег» тока короткого замыкания при этом не уменьшился. Для снижения тока КЗ необходимо уменьшать суммарное время задержки или снижать частоту преобразования, либо использовать более сложные алгоритмы ЧИМ-ШИМ регулирования.

Анализ причин отклонения статической ВАХ ИИСТ с регулированием по мгновенному току первичной обмотки от «идеальной» показывает, что основной причиной является наличие пульсаций тока нагрузки и задержки по цепи ООС. Увеличение индуктивности выходного дросселя — очевидный и простой способ борьбы с искажением статической ВАХ при регулировании по мгновенному току ключа, но этот способ приводит к существенному ухудшению массо-габаритных параметров ИИСТ.

В целом, ключевой преобразователь, каким и является ИИСТ, с обратной связью по среднему току нагрузки обеспечивает более высокие точностные характеристики и имеет отличную помехоустойчивость за счет меньшей полосы пропускания по цепи ООС по сравнению с преобразователем, в котором используется ООС по пиковому (мгновенному) значению тока ключевого транзистора.

На рис. 3 приведены статические ВАХ промышленного сварочного инвертора «Maxstar 150 STL» производства фирмы Miller Electric. Это полупрофессиональный ИИСТ с регулированием по среднему току нагрузки, ориентированный на ручную сварку штучным электродом (MMA-процесс) и сварку неплавящимся электродом в среде защитного газа (TIG-процесс) [3].

Нетрудно заметить отсутствие «выбега» тока КЗ и практически «штыковой» вид ВАХ в области стабилизации тока нагрузки. В области малых токов нагрузки сформирован подъем ВАХ для обеспечения напряжения хо-

лостого хода 70–90 В. Такое напряжение холостого хода гарантирует уверенный поджиг штучных электродов всех типов.

Для иллюстрации предъявляемых требований к блоку управления современного сварочного инвертора рассмотрим обобщенную «типовую» ВАХ, на примере которой можно увидеть, какими функциями производители оснащают современные ИИСТ. На рис. 4 показан пример такой «типовой» статической ВАХ ИИСТ, предназначенного для MMA/TIG процессов.

Участок ABC соответствует минимальному току нагрузки, который может составлять 5–10 А для MMA/TIG инверторов. На примере участка ABDEF показано действие функции регулирования жесткости ВАХ на рабочем участке. Сварщик может изменять наклон рабочего участка ВАХ от положения EF до положения DF. Работа на более пологой ВАХ позволяет в небольших пределах регулировать величину сварочного тока за счет изменения сварщиком длины дуги. Наклон участка BDEG определяется внутренним сопротивлением силовой части ИИСТ, а его положение по оси  $V_0$  — коэффициентом трансформации силового трансформатора. От величины напряжения  $V_{0\_max}$  зависит максимальная длина дуги, ее «эластичность». Излишняя эластичность нежелательна, так как она приводит к повышенному разбрызгиванию и повышенной потребляемой от питающей сети мощности. Обычно длина дуги ограничивается на уровне 2–4 мм. Участок GIJ соответствует максимальному сварочному току ИИСТ, для случая, когда ток КЗ равен току задания (точка J). Часто устанавливают значение тока КЗ больше, чем средний ток нагрузки  $I_{O\_avg}$ , ориентировочно до  $1,5I_{O\_avg}$ . Это позволяет избежать прилипания электрода к холодной детали, и данный метод получил название «форсирование дуги» (Arc-Force). Регулируемая величина  $\Delta I_O$  — глубина форсирования. В ИИСТ с регулированием по мгновенному току первичной обмотки из-за «выбега» тока КЗ форсирование дуги получается «естественным» образом, но его нельзя проконтролировать. Избежать прилипания и облегчить поджиг также помогает функция «горячий старт» (Hot-Start), которая является своего рода «динамическим» форсированием тока дуги: сразу после замыкания электрода на деталь БУ формирует импульс тока в нагрузке больше номинального на 20–200% с длительностью до нескольких десятых долей секунды, после чего ток нагрузки устанавливается соответствующим заданию. Этот алгоритм полезен на этапе пережигания перемычки между торцом электрода и деталью.

В ИИСТ фирмы Lincoln Electric форсированный участок JH на ВАХ делается регулируемым по «высоте»  $\Delta V_0$ . Это позволяет производить сварку короткой дугой на участке JH (Crisp Arc). В режиме TIG очень удобна функция поджига при отрыве электрода (Lift-Arc), наличие которой в сварочном инверторе позволяет, во-первых, реализовать уверенный поджиг касанием вольфрамового электрода о деталь, но без прилипания или обгорания электрода, и, во-вторых, при этом не требует-

ся использование встроенного в ИИСТ (или внешнего) осциллятора — источника высоковольтных импульсов для бесконтактного поджига дуги. Отсутствие встроенного осциллятора существенно упрощает и удешевляет ИИСТ для аргоно-дуговой сварки. Описанные дополнительные функции, характерные для современного ИИСТ, можно встретить под теми или иными фирменными названиями и по-разному реализованными в конкретных изделиях.

Читатель, вероятно, обратил внимание на то обстоятельство, что термин «источник сварочного тока» достаточно условен и носит скорее исторический характер, нежели отражает реальные характеристики источника питания сварочной дуги.

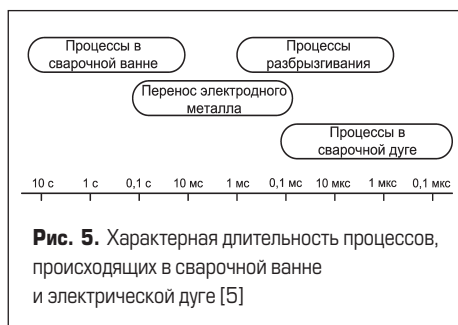
До сих пор рассматривались статические свойства ИИСТ для MMA/TIG процессов, которые характеризуются его статической ВАХ. Динамические свойства ИИСТ также важны, особенно для процесса полуавтоматической/автоматической сварки. Автору не известны работы, посвященные комплексному исследованию динамических свойств ИИСТ с учетом их специфики. Задача построения адекватной эквивалентной схемы и определения передаточных функций ИИСТ с замкнутой и разомкнутой цепью обратной связи, определения области устойчивой работы существенно усложняется из-за особенностей источников питания сварочной дуги. Во-первых, из-за наличия переходных режимов «холостой ход — короткое замыкание», «короткое замыкание — дуга», «дуга — холостой ход», «дуга — короткое замыкание» и их сочетания с установившимся квазистационарным режимом поддержания номинального тока дуги. Во-вторых, из-за необходимости учета набора начальных условий. И, в-третьих, из-за стохастического характера процессов, происходящих в реальной сварочной дуге. Некоторые авторы изучали нелинейную модель сварочного инвертора, в которой в квазистационарном состоянии используется малосигнальное (линейное) приближение, а переходные режимы рассматриваются как сильное возмущение [4]. Разработанная нелинейная модель ИИСТ исследовалась с помощью средств пакета MATLAB, результаты сравнивались с данными, полученными на лабораторном образце сварочного инвертора в режиме перехода от холостого хода в режим стабилизации заданного тока дуги. При этом было получено хорошее количественное соответствие расчетных и экспериментальных результатов, что подтверждает возможность успешного использования методов математического моделирования при изучении динамических свойств ИИСТ.

Очень распространенной и универсальной сварочной технологией сегодня является технология полуавтоматической/автоматической сварки в среде защитного/активного газа (MIG/MAG процесс). Однако принципы регулирования тока нагрузки ИИСТ, предназначенных для MMA/TIG и MIG/MAG процессов, существенно различаются. В простейшем случае источник сварочного тока для MMA/TIG должен обеспечивать падающую, «мягкую» ВАХ, имеющую область стабилизации тока

нагрузки. ИИСТ для MIG/MAG фактически является источником напряжения с жесткой ВАХ и режимом ограничения максимального тока дуги на уровне, определяемом скоростью подачи сварочной проволоки. Сила часть ИИСТ для обоих типов сварочных процессов выполняется практически одинаково, например, в соответствии со схемой (рис. 1) а необходимая статическая ВАХ формируется блоком управления. Следует отметить, что конденсатор  $C_0$  на выходе ИИСТ (рис. 1) не используется при MMA/TIG сварке и желателен при MIG/MAG процессах [10]. Динамическое поведение тока нагрузки ИИСТ с дросселем постоянного тока на выходе определяется индуктивностью этого дросселя, точнее, постоянной времени цепи нагрузки [5]:

$$\tau_{out} = L_0 / R_{load} \quad (7)$$

Для ИИСТ характерная величина  $\tau_{out}$  составляет единицы миллисекунд. Вместе с этим электрические процессы, протекающие в дуге и сварочной ванне, имеют характерную длительность — от 0,1 мкс до 10 с (рис. 5). Таким образом, выходной дроссель, превращая ИИСТ в источник тока во временной области, не позволяет получить высокую динамику сварочного тока, необходимую при полуавтоматической сварке. Поэтому требования к способу регулирования тока дуги при MIG/MAG и MMA/TIG процессах различны. Применение сварочных инверторов для MIG/MAG сварки вместо традиционных низкочастотных выпрямителей позволяет улучшить качество сварного соединения, но для реализации управляемого переноса электродного металла в сварочную ванну, существенного снижения разбрызгивания металла и повышения энергетической эффективности сварочного процесса необходимо одновременно улучшать динамические свойства ИИСТ и использовать новые методы регулирования сварочного тока.



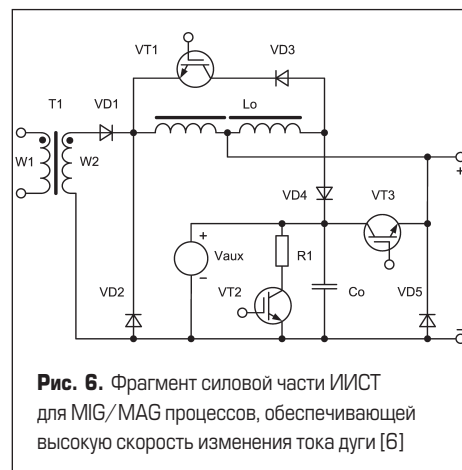
Различают два режима переноса металла в сварочную ванну:

а) Крупнокапельный перенос электродного металла при глубоком погружении электрода в ванну. Капли расплавленного металла, отделяясь от торца электрода и временно замыкая сварочную цепь, переходят в ванну расплава. Желательно, чтобы ток короткого замыкания ИИСТ был существенно больше номинального для быстрого пережигания периодически возникающих перемычек, образующихся между торцом электрода и деталью. Этот режим переноса обычно реализуется при постоян-

ной скорости подачи проволоки, относительно низком выходном напряжении ИИСТ и токе, меньшем критического.

б) Мелкоструйный перенос (спрей-режим). Этот режим устанавливается при относительно большом напряжении на выходе ИИСТ и среднем токе дуги, большем некоторого минимального, критического значения. Перенос металла осуществляется без кратковременных периодических замыканий между торцом электрода и металлом в сварочной ванне, то есть без непосредственного контакта между ними. Электродный металл переносится в виде своеобразного «спрея» из мелких капель. Для снижения величины критического тока в сварочную проволоку вводят специальные легирующие добавки и подбирают состав смеси защитных газов. В последнее время большое внимание уделяется разработке оптимальных методов управления сварочным током для MIG/MAG сварочных инверторов. Общий подход в решении этой задачи заключается в формировании такого профиля импульсов тока, который обеспечил бы необходимый характер переноса металла и минимальный эффект разбрызгивания.

Главной причиной возникновения разбрызгивания электродного металла является слишком большая плотность тока, текущего через перемычку между электродом и деталью, в момент отрыва капли расплава и перехода ее в сварочную ванну. Поэтому прежде всего необходимо обеспечить резкое снижение тока после отрыва капли. Для этого авторы цитируемой работы использовали сварочный инвертор с модифицированной силовой частью и соответствующим алгоритмом управления. Упрощенная часть ИИСТ, обеспечивающая повышенную динамику сварочного тока, показана на рис. 6.



T1 — силовой трансформатор ИИСТ с топологией ОПМК. Специальный двухобмоточный дроссель  $L_0$ , ключ VT1 и блокирующий диод VD3 обеспечивают высокую скорость спада тока дуги. Часть запасенной дросселем энергии передается в конденсатор  $C_0$ . Цепь VT2, R1 предохраняет  $C_0$  от перенапряжения. Конденсатор  $C_0$  или вспомогательный источник питания  $V_{aux}$  вместе с ключом VT3, возвратным диодом VD5 и индуктивностью сварочного кабеля представляют собой источник

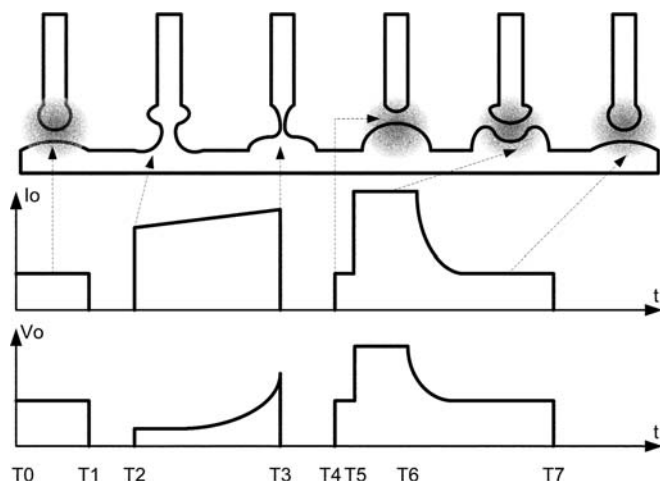


Рис. 7. Импульсы тока и напряжения при использовании технологии STT [9]

напряжения, обеспечивающий высокую скорость нарастания тока нагрузки (крутой фронт импульса тока дуги). Силовые элементы работают только в течение фронта и спада импульсов тока дуги, поэтому эффективность предложенного решения достаточно высока. Удалось получить скорость изменения тока дуги 4 кА/с. Схема использовалась в составе ИИСТ с рабочим током до 650 А при напряжении до 50 В. Получено время реакции тока дуги порядка 0,5 мс, хотя желательно снизить эту величину до 0,1 мс. Разумеется, известны и более простые способы повышения динамики тока ИИСТ: увеличение рабочей частоты преобразователя и снижение индуктивности выходного дросселя, но этим методом присущи свои недостатки. Аналогичный метод управления ИИСТ для полуавтоматической сварки предлагали и другие авторы [7].

Похожий на описанный алгоритм формирования специального профиля импульсов тока дуги был разработан фирмой Lincoln Electric и с успехом используется ею в своих сварочных инверторах для MIG/MAG сварки. Эта технология получила фирменное название "Surface Tension Transfer" (STT) — перенос электродного металла с использованием сил поверхностного натяжения [8]. На рис. 7 показан профиль импульсов тока и напряжения на выходе сварочного инвертора, использующего технологию STT.

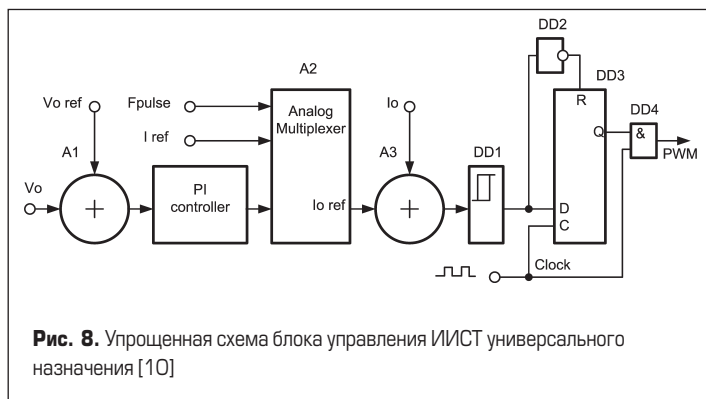
В течение интервала времени T0–T1 происходит оплавление торца электрода за счет установившейся температуры дуги. Ток и напряжение на дуге поддерживаются неизменными: ИИСТ работает в режиме «источника мощности». Формируется капля расплава достаточного размера, которая создает переемычку между торцом электрода и сварочной ванной. В момент T1 блок управления ИИСТ быстро снижает ток в дуге для того, чтобы силы поверхностного натяжения жидкого металла перетянули каплю в сварочную ванну (интервал времени T1–T2). В момент времени T2 ИИСТ формирует импульс тока, который «помогает» капле переместиться в ванну, при этом переемычка между ванной и торцом электрода становится все тоньше. Блок управления ИИСТ постоянно контролирует сопротивле-

ние сварочной цепи и перед разрывом переемычки резко снижает величину тока в момент T3, в результате чего капля переходит полностью в ванну с минимальным разбрызгиванием. В момент T4 восстанавливается дуга, а в момент T5 формируется второй форсирующий импульс тока длительностью T5–T6 для увеличения дугового промежутка и разогрева увеличенной области металла детали для выхода на режим формирования следующей капли. На интервале T6–T7 поддерживается ток, необходимый для формирования капли расплава. Далее весь цикл повторяется, его период составляет порядка 10 мс [9].

Выпускаются сварочные инверторы различного назначения и функциональной насыщенности: от простейших ИИСТ, рассчитанных на какой-то один тип сварочного процесса, до многофункциональных профессиональных аппаратов, поддерживающих практически все типы сварочных процессов. Блок управления такого ИИСТ должен обеспечивать режим «источника тока» для сварочных процессов MMA/TIG и режим «источника напряжения» для процессов MIG/MAG. Кроме этого, многие ИИСТ профессионального уровня позволяют использовать режим импульсной полуавтоматической сварки в среде защитного газа. Этот режим сварки реализуется за счет амплитудной модуляции тока дуги прямоугольными импульсами, частота следования которых обычно выбирается в диапазоне 25–250 Гц. Применение подобного режима позволяет более точно дозировать количество теплоты, подводимой к сварочной ванне, что облегчает сварку тонкостенных деталей, выполнение потолочных швов и т. д.

На рис. 8 показана упрощенная схема блока управления, обеспечивающего работу ИИСТ в режимах MMA/TIG, MIG/MAG и Pulsed MIG/MAG [10].

Режим работы ИИСТ определяется сигналом, поданным на вход Fpulse аналогового перемножителя A2: при Fpulse=1 используются как внутренняя петля ООС по току, так и внешняя петля ООС по напряжению на нагрузке, таким образом, ИИСТ работает в режиме MIG/MAG; при Fpulse=0 используется только ООС по току и ИИСТ работает в режи-



ме MMA/TIG, для реализации режима импульсной полуавтоматической сварки Pulsed MIG/MAG на вход  $F_{pulse}$  подаются прямоугольные модулирующие импульсы с частотой следования 25–250 Гц. Обозначения на рис. 8:  $V_0$  — среднее значение напряжения нагрузки ИИСТ,  $I_0$  — мгновенный ток первичной обмотки силового трансформатора (используется регулирование по мгновенному току нагрузки, приведенному к первичной обмотке трансформатора). Параметры  $V_0$  ref и  $I$  ref — напряжение и ток задания. Собственно ШИ-модулятор состоит из элементов D2, D4, триггера Шмидта D1 и триггера D3, на счетный вход которого подается тактовый сигнал с коэффициентом заполнения 0,45 для обеспечения гарантированного размагничивания магнитопровода силового трансформатора в течение нерабочего полупериода.

Описанная структура блока управления многоцелевого ИИСТ с топологией силовой части, показанной на рис. 1, была проверена авторами на математической модели и на лабораторном прототипе. Экспериментальный сварочный инвертор с максимальным рабочим током до 200 А и частотой преобразования 50 кГц показал удовлетворительные результаты во всех режимах. Предложенный блок управления позволяет построить простой и многофункциональный сварочный инвертор.

Отдельную группу источников сварочного тока составляют сварочные выпрямители для многопостовой сварки, применяемые на предприятиях с большим количеством сварочных рабочих мест («постов»). Традиционно, до широкого распространения ИИСТ, система многопостовой сварки представляла собой общий мощный понижающий трансформатор и вторичный выпрямитель, к которому подключались через балластные реостаты (БР) индивидуальные рабочие места сварщиков. С помощью БР осуществлялась регулировка тока и обеспечивалась развязка индивидуальных рабочих мест.

В настоящее время вместо БР используются электронный регулятор сварочного тока (ЭР), выполненный, как правило, на основе однофазного понижающего конвертера. Применение ЭР позволяет существенно увеличить КПД системы многопостовой сварки, повысить качество сварочных работ и расширить функциональные возможности оборудования: источник сварочного тока на основе ЭР может обеспечить сварщику возможность использовать на рабочем месте сварочные процессы MMA, TIG, MIG, MAG.

Для стабилизации тока нагрузки подобно ЭР авторы работы [11] применили релейный способ регулирования, который редко используется в настоящее время, хотя и имеет известные положительные свойства [12]. Сейчас продолжают исследования этого способа, в частности в отношении его динамических свойств [13].

Блок-схема лабораторного ЭР на ток до 200 А показана на рис. 9. В качестве источника входного напряжения ЭР авторы использовали промышленный сварочный выпрямитель традиционного типа с понижающим трансформатором промышленной частоты. Следует отметить, что подобное объединение промышленного сварочного выпрямителя с ЭР позволяет получить источник сварочного тока с новыми, более высокими характеристиками и функциональными возможностями по сравнению с традиционным выпрямителем. Причем, такого рода «апгрейд» старых сварочных выпрямителей может оказаться экономически более эффективным, чем их замена на новые современные ИИСТ профессионального уровня.

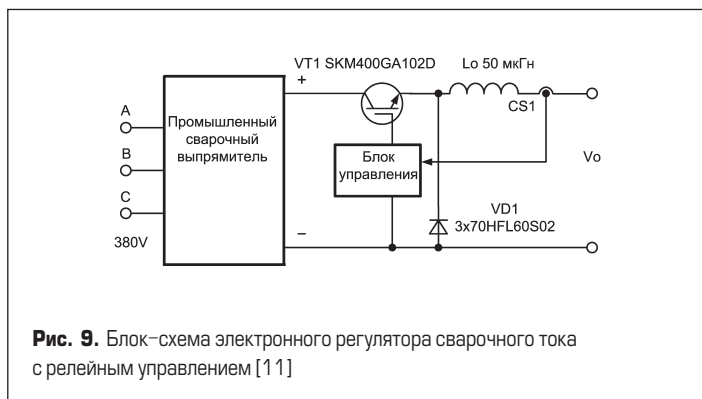
Применение релейного регулирования сварочного тока было обусловлено такими преимуществами этого способа, как:

- регулирование среднего значения сварочного тока в нужном диапазоне при фиксированной величине амплитуды пульсаций;
- возможность изменения величины пульсаций сварочного тока при фиксированном его среднем значении.

Это позволяет исследовать влияние величины пульсаций тока дуги на качественные показатели сварного соединения.

В блоках управления современных ИИСТ постепенно находят применение передовые методы теории управления: управление с использованием алгоритмов нечеткой логики (fuzzy logic control — FL) и скользящих методов регулирования (sliding mode control — SM). Применение этих методов в ИИСТ стимулируется и тем, что они представляют собой мощные средства для управления нелинейными системами, каковыми являются ИИСТ и их нагрузка — сварочная дуга [14], [15].

Сравнительное исследование ИИСТ с FL- и SM-контроллерами показало, что оба метода управления позволяют построить сварочный инвертор с заданными характеристиками, причем FL-контроллер оказался менее чувствительным к разбросу входных и выходных параметров и в целом более надежным. Исследование проводилось на математической мо-



дели ИИСТ в среде MATLAB/Simulink, в качестве силовой части использовался однофазный прямоходовой мостовой конвертер, часто применяемый в сварочных инверторах [16].

Известны примеры практической реализации блока управления ИИСТ с FL-контроллером. Авторы работы [17] использовали алгоритмы нечеткой логики при разработке блока адаптивного управления установкой автоматической сварки вольфрамовым электродом в среде защитного газа (TIG-процесс). Экспериментальная сварочная установка предназначена для автоматической сварки листовых деталей с переменным (ступенчатым) профилем. Сварочная дуга питается от источника стабильного тока, а обеспечение оптимальной геометрии сварочной ванны достигается с помощью автоматического регулирования напряжения на дуге за счет изменения ее длины перемещением неплавящегося электрода относительно свариваемых поверхностей. При традиционном способе регулирования возникали две проблемы: во-первых, блок управления сварочной установкой не позволял корректно организовать процесс поджига дуги в начале сварочного цикла и завершение сварочного шва без образования дефектов; во-вторых, в процессе сварки в некоторых режимах возникали незатухающие паразитные колебания в контуре регулирования, приводящие к периодическому изменению длины дуги. Применение адаптивного FL-контроллера позволило преодолеть указанные проблемы и повысить качество сварного соединения.

## Заключение

Выбор метода управления сварочным инвертором и структуры блока управления часто производится на основе компромисса между техническими параметрами будущего ИИСТ и маркетинговыми задачами. К такому заключению можно прийти, изучив схемотехнику промышленных ИИСТ разного ценового диапазона. В то же время ведутся активные работы по адаптации и применению передовых методов управления в современном сварочном оборудовании. Эта последняя тенденцию стимулирует развитие элементной базы, удобной для реализации новых алгоритмов в устройствах силовой электроники. Сейчас в блоках управления сварочных инверторов все более широко применяются микроконтроллеры, цифровые сигнальные процессоры и программируемые логические матрицы, что

позволяет разрабатывать системы управления ИИСТ с топологией, конфигурируемой как на программном, так и на аппаратном уровнях [18].

### Литература

1. Dudrik J., Bauer P. DC source for arc welding with soft-switching current-mode controlled DC-DC converter // International Review of Electrical Engineering (IEEE). ISSN: 1827-6600, April 2006, pp. 162–169.
2. Martinez A., Blasco N., Perez F.J., Vicuna J.E., Lacamara J., Oliva J.A. Static output characteristic of a pick current controlled arc welding machine / IEEE 49th International Midwest symposium on circuits and systems, vol. 1, 2006, pp. 636–639.
3. Maxstar 150 STL Owner's manual. Miller Electric Mfg. Co, 2003. [www.millerwelds.com](http://www.millerwelds.com)
4. Jinhong Z., Wenlin L., Yaowu S. Study on the dynamic process of arc welding inverter // IEEE Proceed. IPERC, vol. 1, 2000, pp. 308–311.
5. Schupp J., Fischer W., Mecke H. Welding arc control with power electronic / IEE "Power electronics and variable speed drives" conference, Conference publication № 475, 18–19 September, 2000.
6. Merfert I. W. Improving on the dynamic on inverter power sources for pulsed arc welding applications / Ph.D. thesis, University of Magdeburg, 1998.
7. Chae Y. M., Jang Y., Jovanovic M. M., Gho J. S., Choe G. H. A novel mixed current and voltage control scheme for inverter arc welding machine / IEEE Proc. APEC, vol. 1, 2001, pp. 308–311.
8. Stava E. K. Technology gets to the root of pipe welding. Online: <http://www.lincolnelectric.com/knowledge/articles/content/pipewelding.asp>
9. Vincent T. L. Waveform control in welding power supplies / IEEE control system magazine, August, 2006, pp. 17–18.
10. Verdelho P., Pio Silva M., Margato E., Esteves J. An electronic welder control circuit / IEEE Proceed. of the 24th Int. conf. IECON'98, vol. 2, 1998, pp. 612–617.
11. Marques S., Cruz C., Farias J. Step down converter with hysteretic current control for welding applications / IEEE 23rd Intern. conf. on industr. electronics, control and instrum. IECON'97, vol. 2, 1997, pp. 676–681.
12. Levin G., O'Malley K. Designing with hysteretic current-mode control / EDN Access, April, 1994. Online: [www.edn.com/archives/1994/042894/09df3.htm](http://www.edn.com/archives/1994/042894/09df3.htm)
13. Park J. H., Cho B. H. Small signal modeling of hysteretic current mode control using the PWM switch model // IEEE COMPEL Workshop, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, July, 2006, pp. 225–230.
14. Drakunov S., Barbieri E., Silver D. Sliding mode control of a heat equation with application to arc welding / IEEE Proceedings of the International conference on control applications. 15–18 Sept. 1996, pp. 668–672.
15. Junhong Z., Hongfang W. A novel welding inverter power source system with constant current output characteristic based on fuzzy logic control / IEEE Proceed. Electrical machines and systems conference. ICEMS 2001, v. 1, 2001, pp. 567–570.
16. Iskender I., Karaarslan A. On the comparison of fuzzy logic and state space averaging based sliding control methods applied on an arc welding machine // Trans. on engineering, computing and technology, v. 8, ISSN 1305-5313, 2005, pp. 100–105.
17. Koseeyaporn P., Cook G. E., Strauss A. M. Adaptive voltage control in fusion arc welding / IEEE Trans. on industry applications, vol. 36, No 5, 2000, pp. 1300–1307.
18. Rauma K., Laakkonen O., Luukko J., Pajari I., Pyrhonen O. Digital control of switch-mode welding machine using FPGA / IEEE Proceed. PESC, vol. 1, 2006, pp. 1–5.