

На правах рукописи

**ЗЕМСКОВ Антон Владимирович**

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ИНВЕРТОРЫ  
ДЛЯ СВАРКИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ  
И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИХ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»

- Научный руководитель:** кандидат технических наук  
*Бардин Вадим Михайлович*
- Официальные оппоненты:** *Голембиовский Юрий Мичиславович*  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Саратовский  
государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А.»,  
профессор кафедры «Системотехника»
- Коротков Александр Викторович*  
кандидат технических наук,  
технический директор  
ООО «МПП «Энерготехника»,  
г. Саратов
- Ведущая организация:** Саратовский филиал Института  
радиотехники и электроники  
имени В.А. Котельникова РАН,  
г. Саратов

Защита состоится «19» декабря 2013 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.242.10 при ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» по адресу: 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, корп. 1, ауд. 319.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

Автореферат разослан «           » ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Томашевский Ю.Б.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Большая часть представленных на рынке инверторных источников питания для сварки предназначена для осуществления сварки постоянным током величиной до 160-250 А. Несколько лет назад появилась информация о новом классе источников, предназначенных для сварки металлов переменным током частоты 25-35 кГц. Но в обоих случаях до настоящего времени остается недостаточно полно проработанным вопрос об обеспечении стабильности сварочного тока, поскольку от этого во многом зависит прочность сварного соединения. Этот вопрос особенно актуален для источников, в которых существенную роль имеют динамические процессы на различных этапах сварочного цикла: возбуждения дуги, изменения ее длины в процессе сварки, обрыва дуги.

Поскольку упомянутый класс высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе только появился, его особенности и достоинства в полной мере пока не изучены. Кроме обеспечения стабильности сварочного тока практический интерес представляет также возможные способы увеличения мощности высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе. Для многих производственных технологических процессов требуется обеспечить ток величиной до 500 А и более. Решение может быть найдено либо путем увеличения мощности единичных сварочных аппаратов, либо обеспечением параллельной работы маломощных высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе. Параллельная работа источников питания различного назначения на общую нагрузку привлекает внимание специалистов по ряду причин. Во-первых, создаются предпосылки для унификации изделий преобразовательной техники; во-вторых, включение отдельных источников на параллельную работу позволяет при необходимости оперативно наращивать мощность сварочного комплекса; в-третьих, повышается «живучесть» всего комплекса, поскольку выход из строя какого-либо источника приводит не к отказу всей системы, а лишь к снижению обеспечиваемой мощности; в-четвертых, существенно снижаются затраты на резервирование, если оно требуется для обеспечения высокой надежности комплекса.

Поскольку вопросы, связанные с обеспечением высокой стабильности тока высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе, в том числе при их параллельной работе, на этапах сварочного цикла пока изучены явно недостаточно, предложенная тематика диссертационной работы представляется актуальной.

**Целью работы** является повышение стабильности сварочного тока высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе, в том числе при их параллельной работе.

В качестве главных **задач** были поставлены две:

1) выяснить от чего зависит стабильность сварочного тока и как можно ее обеспечить;

2) можно ли обеспечить параллельную работу высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе для наращивания мощности и организации высокой надежности функционирования сварочных комплексов без внешних по отношению к инверторам систем управления.

Решение главных задач потребовало получить ответы на целый ряд частных задач, связанных с изучением влияния различных факторов режима работы и схемотехники инверторов на стабильность сварочного тока.

К частным задачам диссертационной работы отнесены:

1) разработка компьютерной модели высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе, учитывающей специфику схемотехнического построения и особенности работы;

2) формирование нагрузочной характеристики высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе;

3) изучение динамики переходных процессов в системе: источник питания – нагрузка, с целью оценки их влияния на стабильность сварочного тока;

4) оценка возможности обеспечения параллельной работы высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе без внешних систем выравнивания их токов. Выработка требований к идентичности характеристик высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе, для обеспечения их параллельной работы.

**Объектом исследования** являются высокочастотные инверторы для сварки на переменном токе.

**Предметом исследования** является оценка степени влияния на стабильность сварочного тока различных возмущающих факторов, в том числе при параллельной работе высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе.

**Методы и средства исследований.** При выполнении работы использованы методы компьютерного моделирования электрических схем полупроводниковых преобразователей электрической энергии с применением специализированных программных средств Micro – Cap (лицензионная версия), MathCAD (лицензионная версия) и методики приборного анализа процессов в физических моделях источников питания для сварки.

**Научные результаты, выносимые на защиту:**

1) компьютерная модель высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе, позволяющая исследовать происходящие в нем процессы и строить нагрузочные характеристики с требуемыми параметрами, что дает возможность еще на этапе проектирования обеспечивать заданные параметры источников сварочного тока;

2) результаты исследования влияния на стабильность сварочного тока факторов режима и параметров системы управления;

3) способ обеспечения параллельной работы высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе и необходимые условия его осуществления.

**Достоверность научных результатов** обеспечивается использованием аппарата профессиональных пакетов прикладных программ Micro – Cap, MathCAD, а также подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов моделирования и экспериментальных исследований.

**Научная новизна работы:**

1) разработана компьютерная модель высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе, учитывающая элементы силовой части схемы, характеристики инвертора, канала обратной связи и корректирующих звеньев, отличающаяся тем, что она позволяет еще на этапе проектирования получить полезную информацию о характере нагрузочной характеристики инвертора и переходных процессов на различных этапах сварочного цикла, что в конечном итоге может способствовать обеспечению стабильности сварочного тока и высокого качества сварного соединения;

2) на основании исследований определено влияние на нагрузочные характеристики высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе ряда факторов, отражающих конструктивно-технологические различия аппаратов;

3) исследован характер динамических процессов на различных участках сварочного цикла и оценено их влияние на стабильность сварочного тока;

4) разработана компьютерная модель системы из нескольких высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе, работающих на одну нагрузку, учитывающая ее нестационарный характер и позволяющая определить степень влияния ряда факторов (различие в нагрузочных характеристиках, фазах, скважностях импульсов тока и характера динамических процессов на различных участках сварочного цикла) на величину разбаланса токов между инверторами. По результатам исследования предложен способ обеспечения параллельной работы высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе без внешних устройств управления.

**Практическая ценность диссертации**

Предложенная компьютерная модель высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе позволяет путем варьирования параметров и характеристик входящих в нее элементов проводить различные исследования без дорогостоящих и трудоемких физических экспериментов. Полученные результаты и рекомендации позволяют обоснованно осуществлять проектирование электрических схем и конструирование узлов сварочных устройств.

Проведенный анализ динамических процессов в высокочастотном инверторе для сварки на переменном токе и полученные результаты выявили причины нестабильности нагрузочного тока и позволили выработать технические решения по обеспечению требуемого уровня его стабильности.

Предложен способ обеспечения параллельной работы высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе без сложных внешних уст-

ройств управления, но обеспечивающих допустимую величину тока разбаланса между инверторами.

Практическая ценность и полезность работы подтверждена выделением в 2011 году ее автору гранта конкурса «У.М.Н.И.К.» и признание лучшим проектом семинара «From Research to Business» (Финляндия, 2012).

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Предложенная компьютерная модель и полученные на ее основе результаты были использованы при изготовлении макетных образцов высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе и обеспечении их параллельной работы. Нарботанный автором опыт компьютерного моделирования был востребован в процессе совершенствования схемотехнических решений источников гарантированного питания в ЗАО «Конвертор» (г. Саранск).

Результаты внедрения подтверждены соответствующими документами.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на XXXIХ, XXXIХ, XL Огаревских конференциях Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, XV, XVI республиканских научно-практических конференциях молодых ученых аспирантов и студентов Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, X, XI Всероссийской конференции-школы с международным участием «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 2011, 2012), I Всероссийском студенческом научном форуме с участием молодых исследователей «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (Саранск, 2012), IX Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики» (Саранск, 2011), VII Международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики» (Саранск, 2012), XI Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП – 2012 (Новосибирск, 2012), X Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП – 2012 (Саратов, 2012), XII Международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 2013). Получен патент на изобретение и подано две заявки на изобретение по тематике диссертационной работы.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Работа включает введение, четыре главы основного материала, заключение и список использованной литературы. Объем работы составляет 120 страниц, содержит 59 иллюстраций, 2 таблицы. Список использованной литературы содержит 119 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показаны актуальность диссертационной работы, ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

**В первой главе** кратко изложены схемотехника, структура, область применения и особенности работы инверторных преобразователей, в том числе в качестве источников сварочного тока. Приведены сведения об особенностях работы источников питания для сварки, «быстрые» и «медленные» переходные процессы в них. Изложены проблемы обеспечения параллельной работы высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе как способа наращивания общей мощности.

Известные источники для электродуговой сварки позволяют осуществлять сварку только на постоянном токе или током промышленной частоты. В 2010 году на кафедре радиотехники Мордовского государственного университета создан новый класс электросварочных устройств – высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе. Сварка переменным током частоты ультразвукового диапазона (25-75 кГц) имеет целый ряд преимуществ и позволяет получить по сравнению со сваркой на постоянном токе более мелкозернистую структуру шва и повысить прочность сварного соединения не менее чем на десять процентов.

Для осуществления данного вида сварки авторами была предложена электрическая схема инвертора, построенная на основе двух прямоходовых одноктактных модулей, работающих на отдельные первичные обмотки сварочного трансформатора, в результате чего сварочный ток имеет форму двухполярных импульсов. Основная особенность электрической схемы – отсутствие подмагничивания сердечника трансформатора. Кроме того, подключенная к вторичной обмотке трансформатора R C цепочка вместе с индуктивностью выходной обмотки трансформатора обеспечивает требуемое для возбуждения дуги напряжение холостого хода (70-90 В).

Все инверторные преобразователи, работающие в качестве источников сварочного тока, имеют ряд специфических особенностей:

- динамический характер нагрузки;
- широкий спектральный состав тока;
- необходимость формирования нагрузочной характеристики нужного вида;
- необходимость надежного возбуждения электрической дуги;
- необходимость обеспечения высокой стабильности сварочного тока на всех этапах сварочного цикла;
- возможность объединения нескольких источников для работы на общую нагрузку и ряд других.

Эти особенности требуют поиска решений для обеспечения высокой стабильности сварочного тока, но могут быть использованы и для расширения функциональных возможностей аппарата.

Часть из этих особенностей была ранее рассмотрена в работах В.М. Бардина, Д.А. Борисова. В частности, изучены «быстрые» переходные процессы в транзисторных сварочных инверторах, приводящие к появлению импульсных перенапряжений на транзисторах, определен спектральный состав сварочного тока, проведена оценка КПД. Но другие задачи, перечень которых был приведен выше, исследованы не были.

Характерная особенность процесса электродуговой сварки – кратковременные изменения величины тока на всех этапах сварочного цикла. При этом амплитуда сварочного тока изменяется случайным образом как по длительности переходных процессов, так и по частоте их проявлений. В связи с этим динамическое поведение сварочного источника, т.е. его способность обрабатывать такие возмущения за минимальное время и обеспечивать стабильность сварочного тока, является определяющим фактором эффективности и качества сварочного процесса.

Вопросам исследования динамики физических процессов сварки посвящен ряд работ В.А. Бухарова, Г.И. Лескова, В.К. Лебедева, Б.Е. Патона, С.А. Петрова и др.

Вопросам исследования различных аспектов обеспечения параллельной работы преобразовательных модулей, в частности в электроэнергетике, также посвящено значительное число работ. Особенно большой вклад в этом направлении внесли учёные: Г.Г. Адамия, И.И. Артюхов, Е.И. Беркович, Н.И. Бородин, А.С. Васильев, Ю.М. Голембиовский, И.И. Кантер, В.П. Климов, В.В. Смородинов, Ю.Б. Томашевский и др. В их работах сформулированы основные проблемы организации параллельной работы автономных инверторов тока: обеспечение равномерной загрузки параллельно работающих преобразователей в установившихся и переходных режимах, а также обеспечение адаптации структуры системы электроснабжения к изменяющимся параметрам нагрузки по критерию минимизации потерь электроэнергии и экономии ресурса работоспособности вентиляей.

Абсолютное большинство известных публикаций по организации групповой работы инверторов относится к источникам синусоидального тока частоты 50 Гц.

Задача организации параллельной работы автономных инверторов тока решалась и применительно к системам индукционного нагрева металлов.

В целом все варианты схемотехнических решений по выравниванию мощностей между параллельно включенными генераторами переменного тока можно свести к двум способам: централизованного и децентрализованного управления. При централизованном управлении имеется отдельный блок, который обеспечивает синхронизацию работы источников и выравнивание их токов. Децентрализованный принцип предполагает осуществление саморегулирования выходных параметров в каждом источнике без межмодульного соединения по каналам управления. Каждый модуль контролирует только свое напряжение (или ток) и при необходимости кор-



ректирует его. Критерием подстройки может быть знак приращения выходной мощности относительно предыдущего измерения.

Характерный для сварочных аппаратов динамический характер нагрузки при параллельном соединении источников питания для сварки накладывает дополнительные требования по обеспечению стабильности сварочного тока.

Рассмотренные в первой главе диссертации специфические особенности работы высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе и способы обеспечения параллельной работы таких преобразователей позволяют утверждать, что серьезной проработки решений по исследованию динамики переходных процессов на этапах сварочного цикла в источниках питания для сварки, обеспечения параллельной работы высокочастотных инверторов пока проведено не было. Решение задач, поставленных в данной диссертационной работе, позволит устранить эти пробелы.

**Во второй главе** представлена разработанная автором компьютерная модель высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе, учитывающая силовую часть схемы, характеристики инвертора, канала обратной связи и корректирующих звеньев, отличающаяся тем, что она дает возможность еще на этапе проектирования получить полезную информацию о характере нагрузочной характеристики аппарата и переходных процессах на различных этапах сварочного цикла. Эта информация позволяет вырабатывать технические решения с целью обеспечения стабильности сварочного тока. Построена функциональная схема стабилизатора, которая справедлива для приращений токов, напряжений, характеризующих состояние системы.

Программа Micro – Cap 10 (лицензионная версия) позволила соединить на одной схеме источники сигнала, силовую часть, состоящую из транзисторов и трансформатора, нагрузку (сварочную дугу, ВАХ которой нелинейна), схему управления и контур обратной связи с учетом коэффициентов передачи и постоянных времени, а также средства измерения.

На рис.1а представлена электрическая схема силовой части высокочастотного инвертора для сварки, а на рис.1б – ее компьютерная модель.

Наиболее важным показателем высокочастотного инвертора для сварки является его нагрузочная характеристика (НХ), поскольку именно она во многом определяет стабильность сварочного тока и качество сварки. Поэтому важно знать, какие параметры высокочастотного инвертора и каким образом влияют на характер НХ и на ее параметры. Знание факторов и значений элементов электрической цепи, влияющих на форму и стабильность НХ, позволит уже на стадии проектирования закладывать требуемые показатели сварочных устройств.

На рис. 2а представлены расчетная и реальная нагрузочные характеристики высокочастотного инвертора для сварки, а на рис.2б показан механизм влияния НХ на стабильность сварочного тока. Изменения длины дуги (и ее сопротивления) в зависимости от крутизны рабочего участка НХ определяют изменения величины нагрузочного тока (разница  $\mu_1$  и  $\mu_2$  на рис.2б).

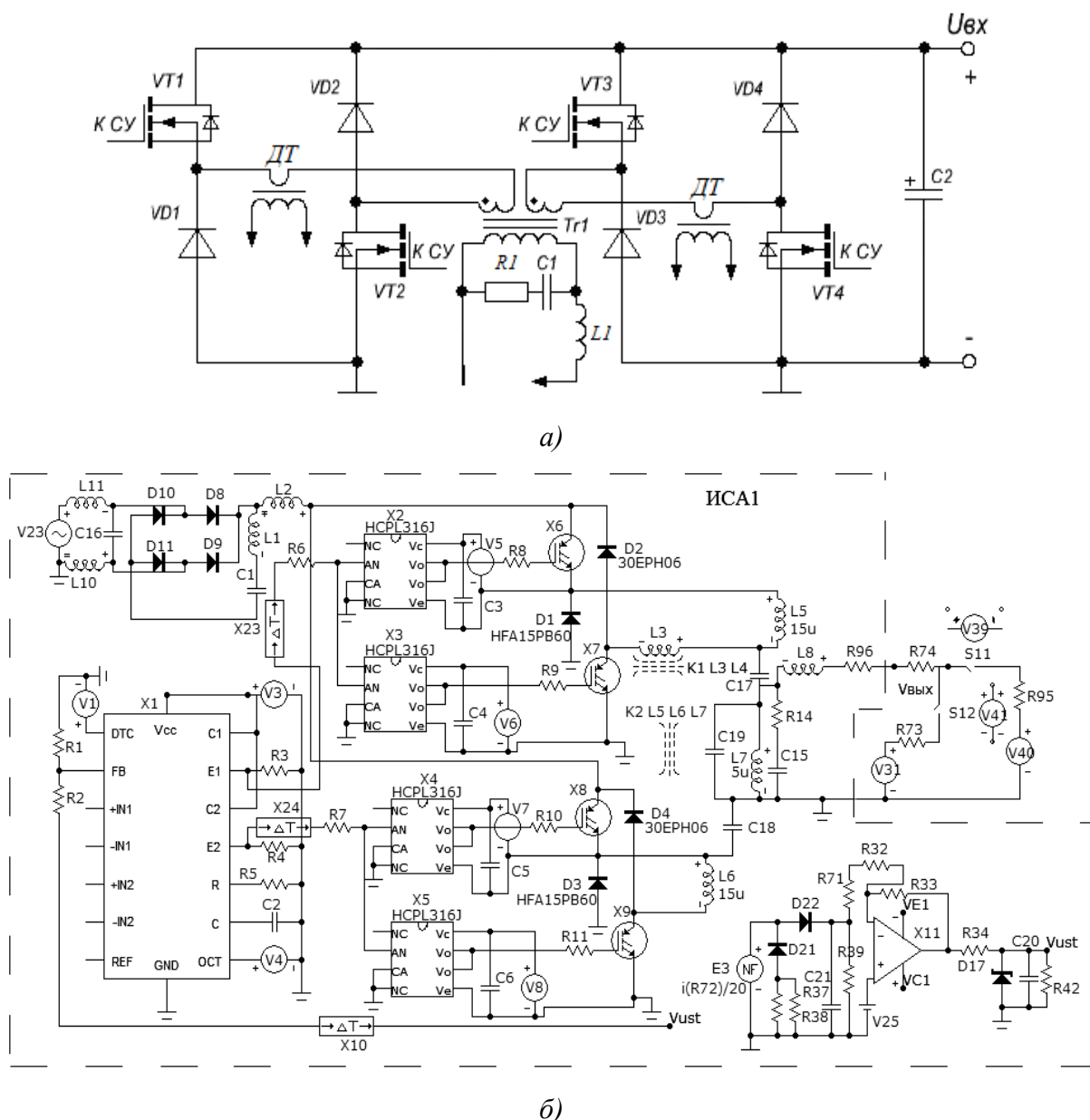


Рис. 1. *а* – электрическая схема высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе; *б* – компьютерная модель высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе

С помощью модели исследовано влияние на крутизну ниспадающего участка НХ коэффициента передачи (КП) и постоянной времени ( $\tau$ ) системы управления. Коэффициент передачи, при котором НХ носит строго крутопадающий характер (*а*), принят за 100%, остальные зависимости (*б* и *в*) построены при его уменьшении.

Определена зависимость погрешности стабилизации тока от КП при колебаниях длины дуги в пределах 2-4 мм, установлено, что при уменьшении КП на 40% отклонение сварочного тока, установленного сварщиком, будет составлять не более 15%.

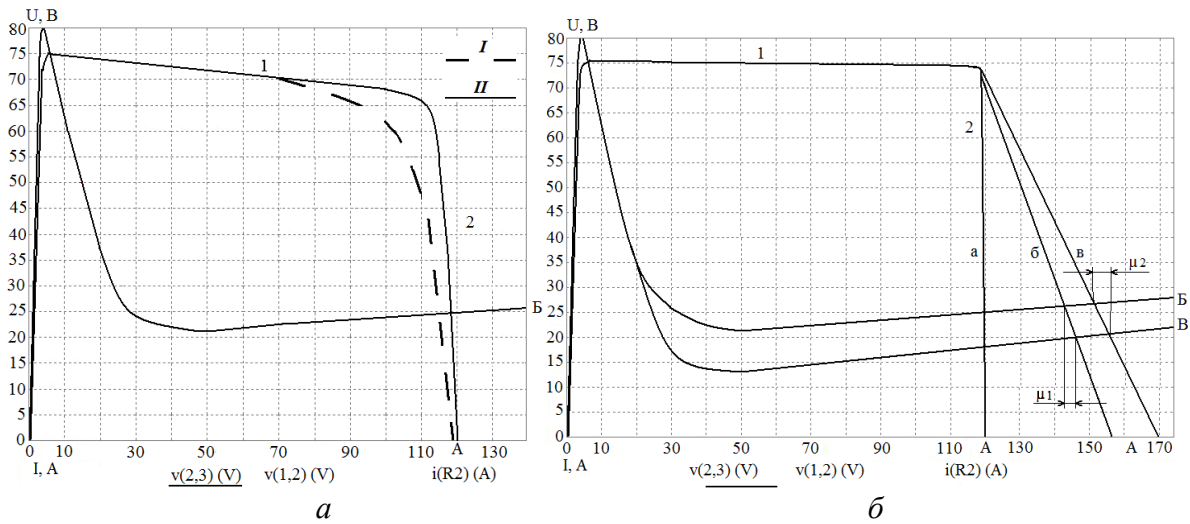


Рис. 2. А – НХ высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе; Б, В – ВАХ сварочной дуги, имитирующей изменение ее длины. I – экспериментально снятая зависимость; II – зависимость, полученная на компьютерной модели

Показано влияние постоянной времени ( $\tau$ ) системы управления на НХ. Цепь обратной связи системы управления состоит из датчика тока, элемента сравнения, усилителя, которые являются инерционными звеньями и все вместе определяют постоянную времени системы регулирования тока. В зависимости от величины  $\tau$  при определенной величине КП в системе может проявиться эффект перерегулирования, снижающий точность стабилизации сварочного тока (рис. 3).

Сравнение расчетной НХ с характеристикой, полученной на физическом образце аппарата, показывает достаточно хорошую сходимость, т.е. подтверждает корректность компьютерной модели.

На основании результатов исследования было предложено техническое решение, обеспечивающее высокое качество сварного соединения и снижение опасности прожигания тонколистового металла. Это обеспечивается путем нормированной подачи в зону сварки тепловой мощности, т.е. стабилизации мощности сварочной дуги при постоянной скорости перемещения сварочного электрода, на что автором был получен патент на изобретение.

В третьей главе приводятся результаты исследований «медленных» электрических процессов, происходящих в высокочастотном инверторе для сварки на переменном токе на различных этапах сварочного цикла.

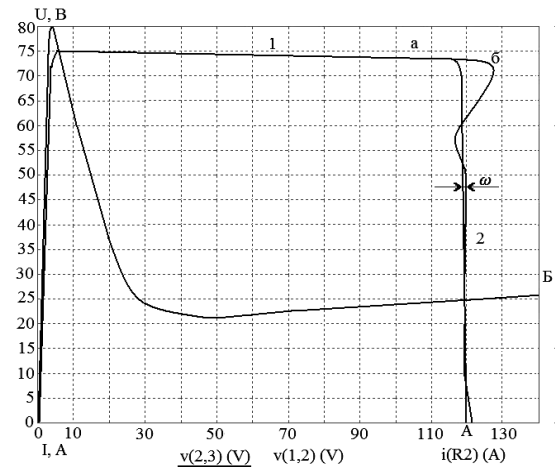


Рис. 3. Зависимость НХ от постоянной времени системы управления:

а – 1 мкс, б – 40 мкс;

А – НХ высокочастотного инвертора,

Б – ВАХ сварочной дуги

Определяются факторы, позволяющие обеспечивать высокие динамические свойства высокочастотного инвертора, в частности стабильность сварочного тока.

Источник питания – сварочная дуга образуют замкнутую динамическую систему. Основной функцией источника в такой системе является обеспечение стабильного процесса сварки. Под стабильностью в данном случае понимается постоянство во времени основных электрических параметров напряжения и тока, обеспечивающих получение качественно сформированного сварного шва. Ошибки регулирования в системе, вызванные действием возмущений, приводят к нарушению стабильности процесса сварки. Например, глубина провара определяется как  $h=k I$ , где  $k$  коэффициент пропорциональности (мм/А), который зависит от рода тока, диаметра электрода, скорости сварки. Значение коэффициента пропорциональности может находиться в пределах 1.1-1.55 (мм/100А). Таким образом, при изменении сварочного тока в переходном процессе глубина провара также изменяется.

На стабильность величины сварочного тока существенное влияние оказывают динамические процессы на этапах сварочного цикла: возбуждения и развития дуги, колебаний длины (сопротивления) дуги на этапе сварки, колебаний напряжения питающей сети.

Основной особенностью на начальном этапе сварки является наличие длительного переходного процесса нарастания тока на выходе источника. В значительной степени длительность переходного процесса определяется соотношением активного и индуктивного сопротивлений вторичного контура. Поэтому ток нарастает не мгновенно, а по закону, близкому к экспоненциальному.

На рис. 4 представлены результаты компьютерного моделирования и физического эксперимента начального пуска высокочастотного инвертора для сварки. Видно, что при возбуждении дуги переходной процесс установления стационарного состояния имеет определенную продолжительность.

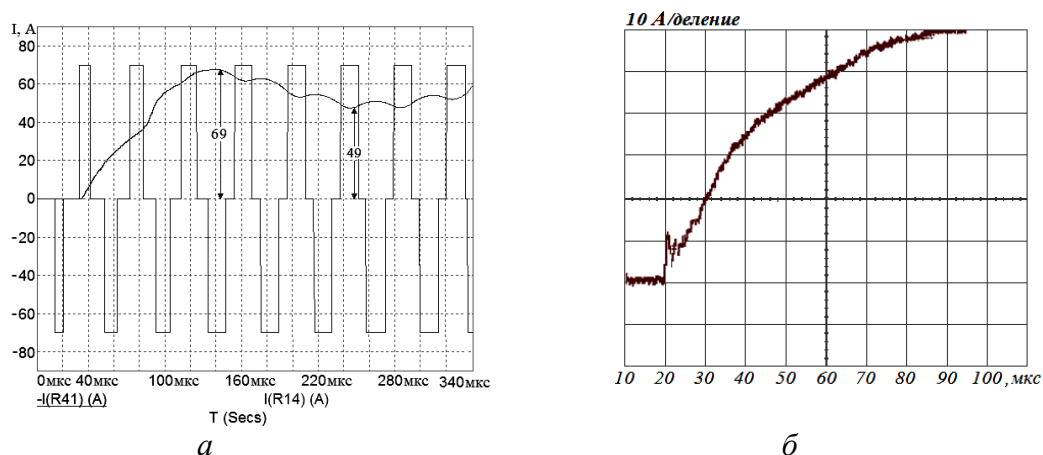


Рис. 4. Характер изменения тока сварочной дуги на этапе ее возбуждения 60 А, полученный на компьютерной модели (а) и на физическом макете (б)

Можно считать, что по истечении времени около 100 мкс от начала разряда между электродами параметры возникающей электрической дуги приобретают значения, свойственные сколь угодно длительно горящей сварочной дуге.

Известно, что в процессе сварки длина дуги, а следовательно, и ее сопротивление могут изменяться. Так, сопротивление может изменяться до 50 %. Соответственно будет изменяться нагрузка инвертора и будут иметь место переходные процессы. На рис. 5а приведена осциллограмма переходного процесса при изменении сопротивления дуги на 20 %, а на рис. 5б, в расчетные зависимости переходных процессов после изменения сопротивления дуги при разных значениях КП и  $\tau$ . Из этих зависимостей следует, что время переходного процесса (без эффекта перерегулирования) можно обеспечить минимальным при определенном сочетании возмущающих факторов.

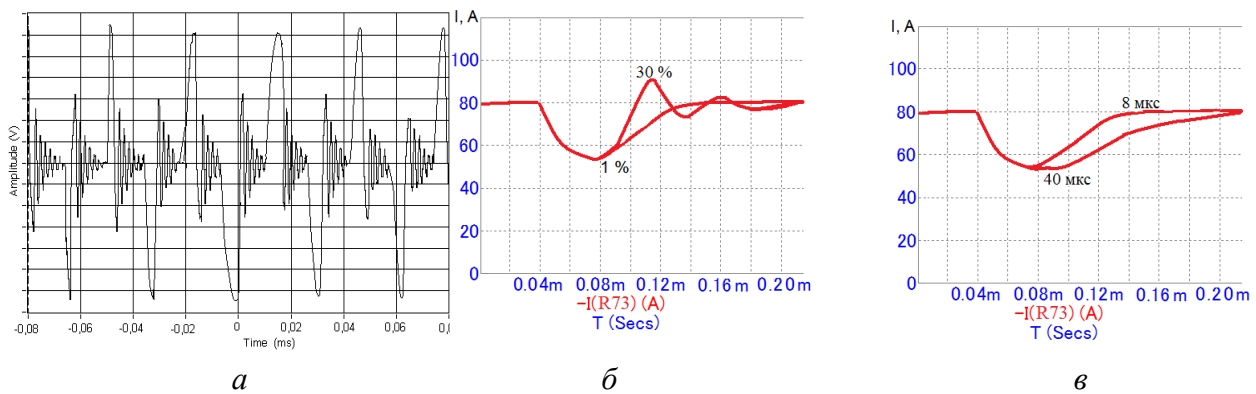


Рис. 5. Осциллограмма переходного процесса при изменении нагрузки (а), расчетные зависимости переходных процессов при изменении нагрузки при разных значениях КП (б) и  $\tau$  (в)

Путем компьютерного моделирования были проведены исследования по одновременному воздействию влияющих факторов на время переходного процесса. В качестве факторов влияния были заданы:

- коэффициент передачи системы управления;
- постоянная времени системы управления;
- коэффициент крутизны нагрузочной характеристики;
- величина индуктивности сварочной цепи.

Результаты моделирования приведены на рис. 6.

Из рис. 6а следует, что при относительно небольших коэффициентах крутизны НХ рост индуктивности сварочной цепи существенно увеличивает длительность переходного процесса. Путем увеличения коэффициента крутизны НХ время этого процесса можно сократить до 100 мкс и менее. Так, например, при  $L > 60$  мкГн увеличение коэффициента крутизны  $K_{НХ}$  с 0.6 до 1 позволяет сократить время переходного процесса с 200 до 100 мкс.

На рис. 6б отображена зависимость времени переходного процесса от одновременного влияния постоянной времени системы управления ( $\tau$ ) и

величины КП. Видно, что существует определенная зона  $5\% < \text{КП} < 30\%$ ,  $8 \text{ мкс} > \tau > 4 \text{ мкс}$ , где время переходного процесса минимально.

Таким образом, путем варьирования параметров системы управления (коэффициентом крутизны НХ, постоянной времени  $\tau$  и коэффициентом передачи КП) и индуктивностью сварочной цепи можно обеспечить минимальное время переходных процессов в системе.

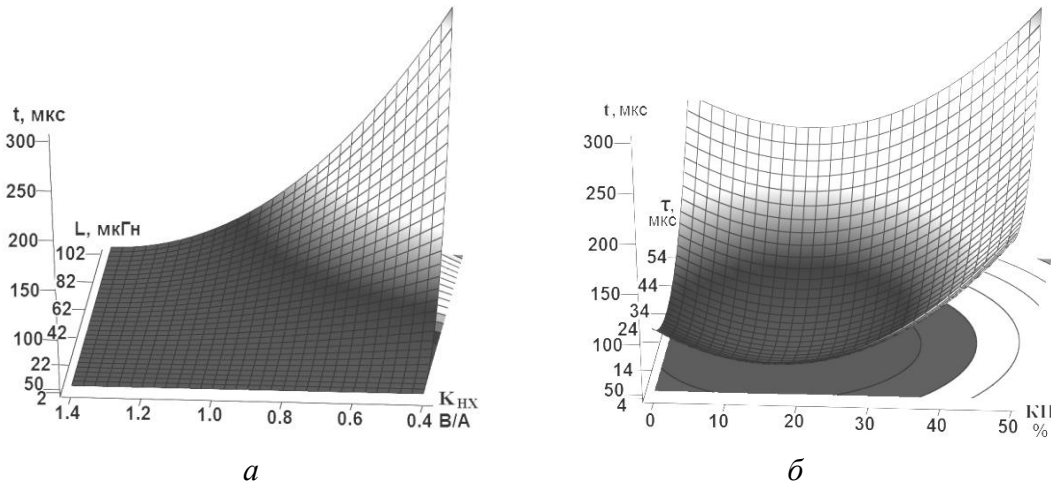


Рис. 6. Зависимость времени переходного процесса от влияния индуктивности сварочной цепи и коэффициента крутизны НХ (а), от влияния коэффициента передачи и постоянной времени системы управления (б)

**В четвертой главе** проведен анализ факторов, влияющих на параллельную работу высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе. На основании результатов компьютерного моделирования и физического эксперимента выработаны требования к параметрам инверторов для обеспечения их параллельной работы на одну нагрузку при допустимом разбалансе токов между ними без применения внешних устройств выравнивания токов.

Параллельная работа высокочастотных инверторов для сварки будет возможна при обеспечении минимального разбаланса их токов. В идеальном случае такого разбаланса вообще не должно быть. Поскольку обеспечить абсолютную идентичность конструкторско-технологического исполнения аппаратов невозможно, некоторый разбаланс токов будет иметь место. Величину предельно допустимого разбаланса токов можно задать, основываясь на анализе факторов, которые могут оказывать влияние на эту величину. К таким факторам отнесены:

- различие в тактовых частотах;
- фазовый разбаланс отпирающих импульсов;
- различие в нагрузочных характеристиках аппаратов;
- различие в длительностях токовых импульсов (скважности);
- различие в характере и времени переходных процессов на этапе возбуждения дуги и изменении ее сопротивления на этапе горения.

Одним из факторов, который может оказать влияние на величину тока разбаланса, является фазовый сдвиг между импульсами выходных токов

инверторов. Даже при жесткой тактовой синхронизации в системе «ведущий – ведомый» временная задержка в цепи межаппаратной связи и разные постоянные времени цепей формирования отпирающих импульсов могут привести к некоторому фазовому сдвигу между передними фронтами импульсов выходных токов инверторов. При этом будет изменяться как форма импульсов суммарного тока, так и величина разбаланса токов (рис. 7а, б).

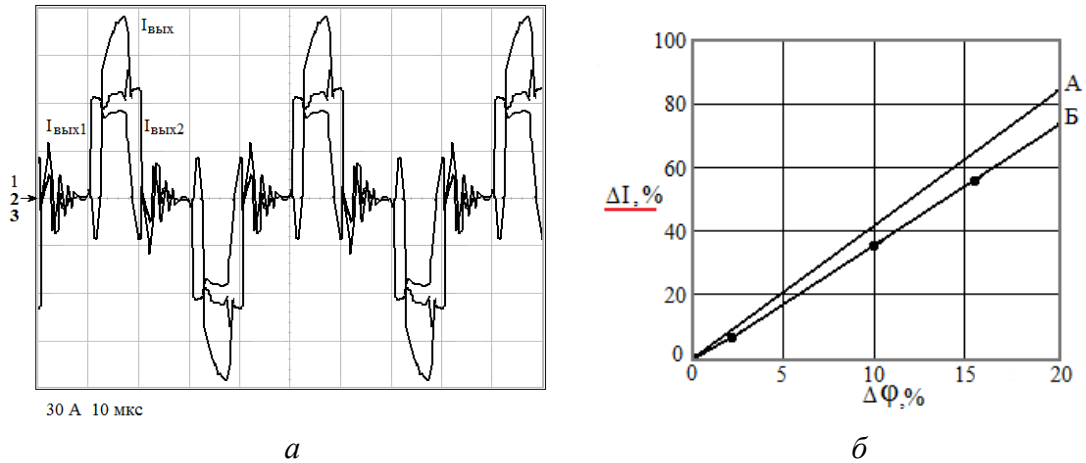


Рис. 7. а – осциллограмма, полученная на выходе параллельно включенных физических макетов на этапе горения сварочной дуги при разбалансе их фаз, б – зависимость разбаланса токов между инверторами от разбаланса фаз импульсов. А – зависимость, построенная на основе результатов компьютерного моделирования, Б – зависимость, построенная на основе результатов, полученных экспериментальным путем

Как было сказано в главе 2, ток каждого инвертора определяется точкой пересечения ВАХ дуги и нагрузочной характеристики аппарата. Если будут различаться нагрузочные характеристики высокочастотных инверторов для сварки, то будут различаться и их токи, и, следовательно, появиться ток разбаланса. Такой же эффект будет наблюдаться и при изменении длины дуги  $l$ . Результаты исследований приведены на рис. 8а, б.

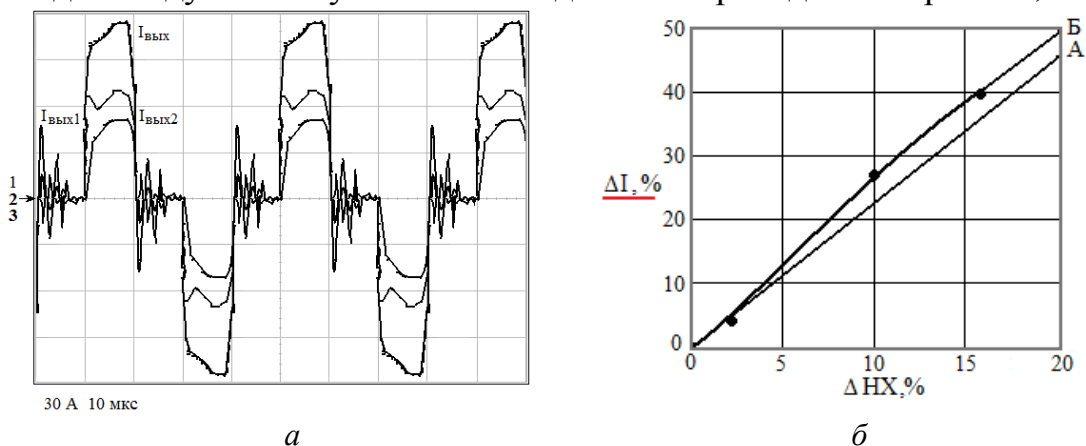


Рис. 8 а – осциллограмма, полученная на выходе параллельно включенных физических макетов на этапе горения сварочной дуги при разбалансе их амплитуд, б – зависимость разбаланса токов между инверторами от различия нагрузочных характеристик высокочастотных инверторов. А – зависимость, построенная на основе результатов компьютерного моделирования, Б – зависимость, построенная на основе результатов, полученных экспериментальным путем

Длительность импульсов тока инверторов при одинаковой тактовой частоте в определенной мере зависит от формирующих управляющие импульсы элементов системы управления. Различия в длительности импульсов приводят к изменению скважности токовых импульсов высокочастотных инверторов и появлению тока разбаланса (рис. 9а, б).

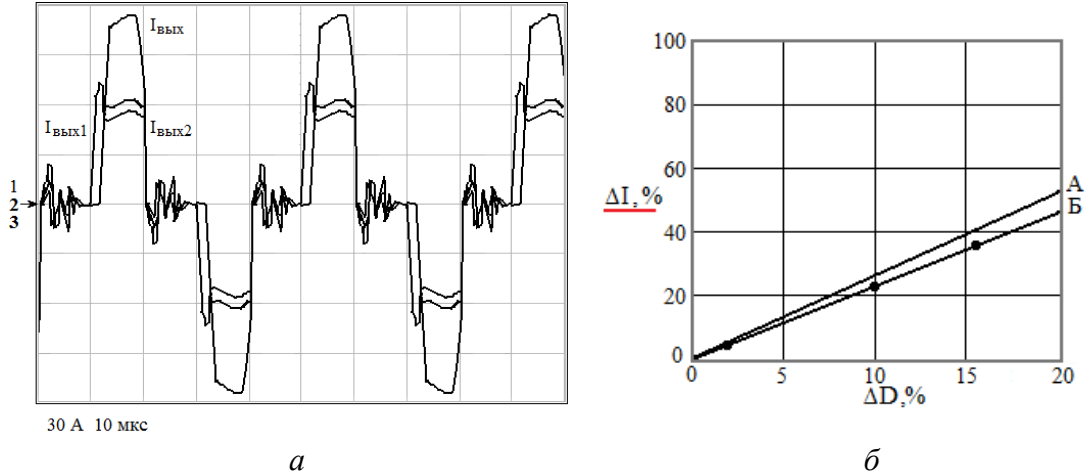


Рис. 9. а – осциллограмма, полученная на выходе параллельно включенных физических макетов на этапе горения сварочной дуги при различной скважности импульсов, б – зависимость разбаланса токов между инверторами от разбаланса скважности импульсов. А – зависимость, построенная на основе результатов компьютерного моделирования, Б – зависимость, построенная на основе результатов, полученных экспериментальным путем

Если длительность и характер переходных процессов в двух высокочастотных инверторах будут различаться, то это приведет к кратковременным разбалансам их токов. Особенно это будет заметно, если на выходе инверторов отсутствуют дроссели. На рис. 10 приведены графики, отражающие влияние различия во времени переходных процессов на величину тока разбаланса между высокочастотными инверторами.

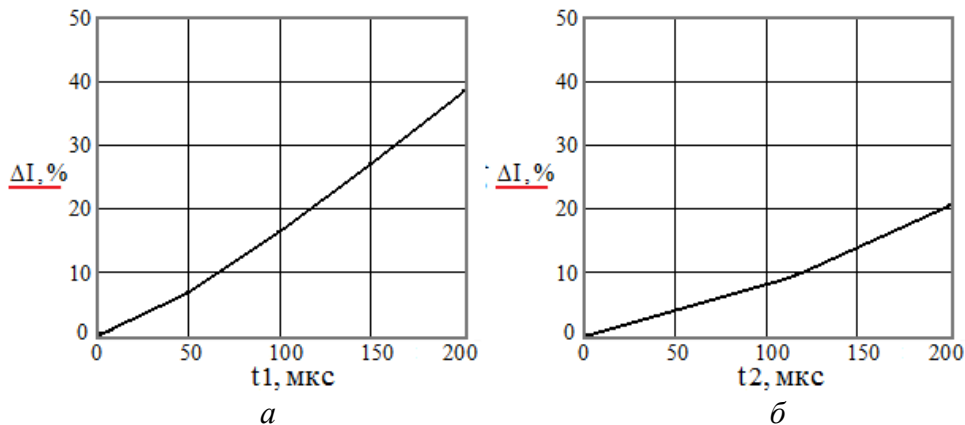


Рис. 10. Зависимость разбаланса токов от различия времен переходных процессов инверторов: а – на этапе возбуждения сварочной дуги ( $t1$ ); б – при изменении сопротивления сварочной дуги ( $t2$ )



На рис. 11 приведена зависимость среднего тока разбаланса между тремя высокочастотными инверторами при их работе от трехфазной сети. За критерий разбаланса принято различие их нагрузочных характеристик.

Как показал анализ полученных зависимостей, при работе нескольких аппаратов от трехфазной сети, при увеличении числа параллельно работающих высокочастотных инверторов для сварки увеличивается эффект самовыравнивания мощности нагрузки между ними.

На основании полученных результатов можно в первом приближении сформулировать требования к идентичности технических параметров и характеристик высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе для обеспечения их параллельной работы без внешних систем выравнивания токов. Учитывая, что наиболее существенными факторами, влияющими на разбаланс токов, являются нагрузочная характеристика и скважность импульсов, в качестве требований при проектировании и изготовлении высокочастотных инверторов можно наложить ограничения на различие нагрузочных характеристик не более 5 %, а на скважность импульсов тока – не более 5 мкс при допустимом разбалансе токов не более 10 %.

Из результатов компьютерного и физического моделирования следует, что существует хорошая качественная и количественная сходимость, расхождение между результатами не превышает 3-7 %. Из этого можно сделать вывод, что результаты исследования компьютерной и физической моделей адекватно отображают характер процессов в высокочастотных инверторах для сварки на переменном токе при их параллельной работе.

Для подтверждения результатов параллельной работы высокочастотных инверторов для сварки с учетом процессов, происходящих в сварочной дуге, был выполнен эксперимент по сварке металлов реальной сварочной дугой.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена компьютерная модель высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе, построенная с учетом его специфических особенностей (ШИМ регулирование тока, резонансное возбуждение дуги, нестационарный характер нагрузки).

2. Предложена компьютерная модель нагрузочной характеристики, позволяющая еще на этапе проектирования получать требуемый вид этой зависимости. Показан механизм взаимодействия нагрузочной характеристики инвертора с вольтамперной характеристикой электрической дуги, который в

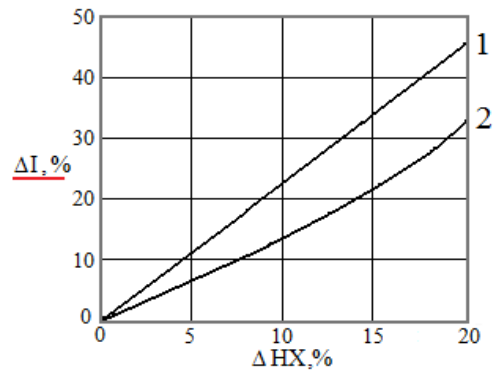


Рис. 11. Зависимость разбаланса токов между двумя (1) и тремя (2) инверторами от различия нагрузочных характеристик высокочастотных инверторов

основном определяет степень стабильности сварочного тока в процессе работы. Сравнение расчетной нагрузочной характеристики с полученной путем физического эксперимента (на макетном образце аппарата) показало достаточно хорошую сходимость и подтвердило корректность компьютерной модели.

3. Путем компьютерного и физического экспериментов исследован характер и оценены количественные характеристики переходных процессов в высокочастотном инверторе для сварки и их влияние на стабильность сварочного тока на основных этапах сварочного цикла. Определены границы изменения влияющих факторов на стабильность сварочного тока, при которых время переходных процессов минимально.

4. Предложен способ обеспечения параллельной работы высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе, основанный на задании требований к идентичности технических характеристик отдельных аппаратов и не требующий создания внешнего устройства выравнивания их токов. С помощью компьютерной модели системы параллельно работающих высокочастотных инверторов получены результаты, позволившие оценить степень влияния ряда факторов на разбаланс токов между инверторами. К таким факторам отнесены: различие в нагрузочных характеристиках, фазах и скважностях импульсов тока. Оценено влияние динамических (переходных) процессов в системе на стабильность сварочного тока и на ток разбаланса между инверторами. Полученные результаты могут оказаться полезными при проектировании не только сварочных аппаратов, но и других преобразователей с выходом на переменном токе.

5. Созданы физические модели (макетные образцы) высокочастотных инверторов для сварки на переменном токе частоты ультразвукового диапазона, на которых осуществлена экспериментальная проверка полученных при компьютерном моделировании результатов. Полученные результаты показали удовлетворительную сходимость. Экспериментально подтверждена возможность параллельной работы двух высокочастотных инверторов на реальную нагрузку (сварочную дугу).

**Основные положения диссертации опубликованы  
в следующих печатных работах:**

***В изданиях, рекомендованных ВАК РФ***

1. Земсков, А.В. Динамика переходных процессов в сварочных инверторах / В.М. Бардин, Д.А. Борисов, А.В. Земсков // Практическая силовая электроника. 2012. № 3. С. 52-55.

2. Земсков, А.В. Спектральный состав знакопеременного тока сварочного инвертора / А.В. Земсков, А.В. Пивкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 1. С. 97-104.

3. Земсков, А.В. Нагрузочная характеристика сварочного инвертора / В.М. Бардин, А.В. Земсков // Практическая силовая электроника. 2013. № 2. С. 52-55.

4. Земсков, А.В. Новый класс сварочных инверторов / В.М. Бардин, Д.А. Борисов, А.В. Земсков, А.В. Пивкин // Электротехника. 2012. № 6. С. 60-64.

5. Земсков, А.В. Формирование нагрузочной характеристики сварочного инвертора / В.М. Бардин, А.В. Земсков // Электротехника. 2013. № 6. С. 39-41.

6. Земсков, А.В. Параллельная работа сварочных источников переменного тока / В.М. Бардин, А.В. Земсков // Электротехника. 2013. № 8. С. 39-42.

#### *Свидетельства и патенты*

7. Патент 2463137, МПК В23 К9/095. Источник питания для дуговой сварки / В.М. Бардин, Д.А. Борисов, А.В. Земсков (RU). Оpubл. 2011, бюл. № 34.

#### *В других изданиях*

8. Земсков, А.В. Исследование динамических свойств сварочного инвертора / В.М. Бардин, А.В. Земсков // Электроника и информационные технологии. – 2010. Вып. 2 (9). <http://fetmag.mrsu.ru/2010-2/pdf/WeldingArc.pdf> Регистрационный номер: 0420900067/0038.

9. Земсков, А.В. Динамика переходных процессов в сварочном инверторе / В.М. Бардин, А.В. Земсков // XXXIX Огарёвские чтения: материалы науч. конф.: в 3 ч. Ч. 1. Технические науки. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2011. С. 104-107.

10. Земсков, А.В. Сравнение динамики переходных процессов в сварочных инверторах / А.В. Земсков // Сборник научных трудов XV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2011. С. 93-94.

11. Земсков, А.В. Организация параллельной работы сварочных аппаратов переменного тока высокой частоты для целей сварки и ТВЧ-нагрева / В.М. Бардин, А.В. Земсков // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: сб. тр. 10-й Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2011. С. 159.

12. Земсков, А.В. Возможность использования ИСА переменного тока в качестве источника индукционного нагрева / Д.А. Борисов, А.В. Земсков, С.Г. Косов // XL Огарёвские чтения: материалы науч. конф.: в 3 ч. Ч. 2. Естественные науки. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. С. 22-23.

13. Земсков, А.В. Универсальный источник питания для мощных светодиодных излучателей / В.М. Бардин, Д.А. Борисов, А.В. Земсков // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: сб. науч. тр. IX Международной научно-технической конференции. Саранск: Изд-во Афанасьев В.С., 2011. С. 250-252.

14. Земсков, А.В. Многофункциональный инвертор на силовых IGBT транзисторах / В.М. Бардин, Д.А. Борисов, А.В. Земсков // Сборник трудов VII Международной научно-технической конференции. Фундаментальные и прикладные проблемы физики. Саранск: Изд-во Мордов. пед. ин-та, 2012. С. 79-81.

15. Земсков, А.В. Расширение функциональных возможностей инверторов на IGBT транзисторах / Д.А. Борисов, А.В. Земсков // Сборник научных трудов XVI научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. С. 180-183.

16. Земсков, А.В. Исследование переходных процессов в инверторном источнике питания для сварки переменным током высокой частоты / А.В. Земсков // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2012: сб. тр. 10 юбилейной Международной научно-технической конференции. Саратов: Изд. центр «Наука», 2012, С. 291-295.

17. Земсков, А.В. Электросварочная техника нового класса / В.М. Бардин, Д.А. Борисов, А.В. Земсков // Актуальные проблемы электронного приборостроения

АПЭП – 2012: материалы XI Международной конференции. Новосибирск: Изд-во Новосибир. техн. ун-та, 2012. С. 148-150.

18. Земсков, А.В. Способы обеспечения групповой работы устройств силовой электроники / А.В. Земсков, Д.А. Борисов // Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук: сб. тр. I Всерос. студенческого научного форума с участием молодых исследователей. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. С. 163-166.

19. Земсков, А.В. Многофункциональное сварочное устройство / А.В. Земсков, Д.А. Борисов // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: сб. тр. 11-й Всероссийской с международным участием конференции-школы для молодежи. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. С. 184.

20. Земсков, А.В. Исследование переходных процессов в инверторном сварочном аппарате знакопеременного тока на этапах сварочного цикла / В.М. Бардин, А.В. Земсков // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: сб. тр. 12-й Международной научной конференции-школы. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. С. 185.

Подписано в печать 14.11.13

Бум. офсет.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,0

Заказ 187

Формат 60×84 1/16

Уч.-изд. л. 1,0

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Тел.: 24-95-70; 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru