

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт неразрушающего контроля  
Направление подготовки «Машиностроение»  
Кафедра оборудования и технологии сварочного производства

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Моделирование конструкции инвертора сварочного тока и разработка документации УДК 621.314.572:621.791.037-048.32

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ41	Вахрушев Александр Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой	Киселев Алексей Сергеевич	Доцент, к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой	Чистякова Наталья Олеговна	Кандидат экономических наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Юлия Владимировна	Кандидат технических наук.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. Кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОТСП ИНК ТПУ	Киселев Алексей Сергеевич	Доцент, к.т.н.		

Томск – 2016 г.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт неразрушающего контроля  
Направление подготовки (специальность) - Машиностроение  
Кафедра - Оборудования и технологии сварочного производства

Утверждаю:  
Зав. кафедрой ОТСП  
\_\_\_\_\_ Киселев А.С.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**На выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме: \_\_\_\_\_ магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

---

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ41	Вахрушеву Александру Владимировичу

Тема работы:

Моделирование конструкции инвертора сварочного тока и разработка документации	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	27.03.2015 №1890/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Ручная дуговая сварка электродом с основным типом покрытия в условиях возмущающего действия внешнего магнитного поля
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Литературный обзор методов борьбы с магнитным дутьем, особенностей поведения сварочной дуги при возмущающем воздействии магнитного поля, исследовании в области сварки намагниченных деталей</li><li>2. Расчет основных характеристик электронных и электротехнических изделий, используемых при проектировании и сборке инвертора сварочного тока</li><li>3. Компоновка и конструирование инвертора</li></ol>

	сварочного тока 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 5. Социальная ответственность 6. Заключение и выводы
<b>Перечень графического материала</b>	1. Тема диссертации 2. Обоснование выбора данной темы 3. Актуальность работы 4. Цель и задачи исследования 5. Исследования, проводившиеся для решения поставленных задач 6. Заключение и выводы
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
1. Литературный обзор 2. Экспериментальная часть 3. Конструкторская часть 4. Заключение	Гордынец Антон Сергеевич
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Чистякова Наталья Олеговна
6. Социальная ответственность	Анищенко Юлия Владимировна
<b>Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	Литературный обзор: исследование поведения сварочной дуги в магнитном поле: обрывная длина, угол наклона дуги, а также влияние частоты переменного тока на дугу

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	25.09.2014
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Киселёв Алексей Сергеевич	к.т.н.		25.09.2014

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ41	Вахрушев Александр Владимирович		25.09.2014

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт неразрушающего контроля  
Направление подготовки (специальность) - Машиностроение  
Кафедра – Оборудования и технологии сварочного производства  
Период выполнения(осенний / весенний семестр 2014/2015 и 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация
--------------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела
02.04.2016	1. Литературный обзор	25
12.04.2016	2. Экспериментальная часть	10
13.05.2016	3. Конструкторская часть	25
26.05.2016	4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
26.05.2016	5. Социальная ответственность	15
30.05.2016	6. Заключение и выводы	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Киселёв Алексей Сергеевич	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

зав. Кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОТСП	Киселёв Алексей Сергеевич	к.т.н., доцент		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа – 115 с., 27 рисунков, 29 таблиц, 27 использованных источников, 2 приложения.

Ключевые слова: сварка, магнитное дутье при сварке покрытыми электродами, переменный ток с прямоугольной формой волны, инвертор сварочного тока, мостовая схема преобразователя.

Объектом исследования выпускной квалификационной работы является оборудование для дуговой сварки намагниченных деталей переменным прямоугольным током, а именно ИСТ-201.

Цель работы – снижение массы и габаритных размеров инвертора сварочного тока ИСТ-201 при сохранении остальных технических характеристик неизменными, снижение себестоимости.

В работе исследована возможность замены полупроводниковых IGBT-модулей CM300DY–12NF и радиатора их охлаждения типа O55 на дискретные транзисторы с изменением системы охлаждения. Показано, что результаты работы позволяют уменьшить массу и габаритные размеры инвертора, а так же его себестоимость.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ отечественной и зарубежной литературы, сформулирована актуальность исследований с постановкой задачи;
- проведен анализ схемотехнических решений сварочного оборудования, связанных с данной проблемой;
- разработана трехмерная модель будущего инвертора сварочного тока.

## Определения, обозначения, сокращения и нормативные ссылки

В настоящей работе применены следующие термины с соответствующими определениями.

Сварка — технологический процесс получения неразъёмного соединения посредством установления межатомных и межмолекулярных связей между свариваемыми частями изделия при их нагреве (местном или общем), и/или пластическом деформировании. При ручной дуговой сварке используют электрод с нанесённым на его поверхность покрытием (обмазкой).

Магнитное дутье – это воздействие на сварочную дугу магнитным полем при взаимодействии магнитного поля изделия и магнитного поля электрода, которое приводит к отклонению дуги от оси электрода и от зоны сварки.

Ферромагнитный материал - материал, который проявляет явления гистерезиса и насыщения, и проницаемость которого зависит от напряженности магнитного поля.

Переменный ток — электрический ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению или, в частном случае, изменяется по величине, сохраняя своё направление в электрической цепи неизменным.

Сварочный инвертор — это устройство, преобразующее постоянное напряжение в переменное.

Транзистор — радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала, служащий для изменения сигнала между двумя различными состояниями при изменении сигнала на управляющем электроде.

Варистор - это нелинейный элемент, сопротивление которого резко уменьшается при превышении порогового напряжения. Применяются для защиты от скачков напряжения.

В настоящей работе применены следующие обозначения и сокращения:

- ЭДС – электродвижущая сила;
- IGBT - Insulated-gate bipolar transistor;
- БТИЗ - Биполярный транзистор с изолированным затвором;
- УЗИП – устройство защиты от импульсных перенапряжений;

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

- РД 25.160.00 – КТН011-10 – «Сварка при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов»;
- ГОСТ 12.1.003-83 – «Шум. Общие требования безопасности»;
- СНиП 23-03-2003 – «Защита от шума»;
- ГОСТ 12.3.003-86 «Система стандартов безопасности труда. Работы электросварочные»;
- ФЗ-123 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность»;
- ГОСТ 12.1.010-76 «Система стандартов безопасности труда. Взрывобезопасность»;
- ГОСТ 12.3.002-75 «Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные»;
- ГОСТ 12.1.005 – 88 «Общие санитарные и гигиенические требования к воздуху в рабочей зоне».

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	10
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	11
1.1 Явление магнитного дутья при дуговой сварке	11
1.2 Способы устранения эффекта магнитного дутья	12
1.3 Влияние поперечного магнитного поля на пространственное положение сварочной дуги	14
1.4 Дуга как модель упругого тела	15
1.5 Применение переменного тока для сварки намагниченных деталей	18
1.6 Особенности сварки на переменном токе	20
1.7 Источники питания для сварки на переменном токе	22
1.8 Разработка инвертора для сварки намагниченных деталей	23
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	27
2.1 Конструкция инвертора сварочного тока	31
2.2 Выбор транзисторов для инвертора сварочного тока	31
2.3 Выбор системы охлаждения инвертора	34
2.4 Проверка работы транзисторов и системы охлаждения	36
2.5 Расчет теплового режима IGBT транзистора	37
2.6 Тепловой расчет варисторного блока	40
2.6.1 Расчет тепловых потерь варистора	40
2.6.2 Расчет количества варисторов на блоке	42
3 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ	44
3.1 Компоновка и создание трехмерной модели инвертора сварочного тока	44
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСО-СБЕРЕЖЕНИЕ	48
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	48
4.1.1 FAST – анализ	48
4.1.2 SWOT-анализ	52
4.1.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации	55

4.2	Планирование научно – технических работ	57
4.2.1	Структура работ в рамках научного исследования	57
4.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ	57
4.2.3	Разработка графика проведения научного исследования	58
4.3	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	62
4.3.1	Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты	62
4.3.2	Специальное оборудование для научных работ	62
4.3.3	Основная заработная плата	63
4.3.4	Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	65
4.3.5	Отчисления на социальные нужды	66
4.3.6	Накладные расходы	66
4.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	67
5	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	69
5.1	Производственная безопасность при сварке намагниченных деталей	69
5.1.1	Анализ вредных и опасных факторов	70
5.1.2	Защита органов дыхания от сварочных аэрозолей	71
5.1.3	Защита от поражения электрическим током	73
5.1.4	Шумы и вибрации	75
5.1.5	Недостаточное освещение	76
5.1.6	Микроклимат	77
5.2	Экологическая безопасность	80
5.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	81
5.4	Организационные вопросы обеспечения безопасности	83
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ	86
	СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА	87
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	88
	Приложение А	91
	Приложение Б	105

## Введение

Дуговая сварка, это основной способ сварки плавлением, а её наиболее распространённым видом является ручная дуговая сварка покрытыми электродами.

В связи со стремительным темпом развития топливно-энергетического комплекса, где основным способом транспортировки являются трубопроводы, возникает необходимость в контроле за техническим состоянием магистральных трубопроводов. Решение данной проблемы осуществляют с использованием внутритрубных инспекционных снарядов, которые служат для выявления в стыковых сварных швах деталей из углеродистых ферромагнитных сталей непроваров, трещин, пор, цепочек шлаковых включений и, резко отличающихся по своим магнитным свойствам от металла сварного соединения.

В процессе работы дефектоскоп путем воздействия постоянных магнитов намагничивает до насыщения стенки трубы, что в конечном итоге отрицательно воздействует на процесс ведения сварки вследствие возникновения эффекта магнитного дутья, который вызывает отклонение дуги и уменьшение ее влияния на сварочную ванну.

Инновационным решением этой проблемы является использование переменного прямоугольного тока, которое реализовано в инверторе сварочного тока ИСТ-201. Однако у ИСТ-201 есть недостатки, которые снижают его мобильность: большой вес (40 кг) и габаритные размеры (Д×Ш×В): 490×370×410 мм.

Поэтому целью данной работы является снижение массы и габаритных размеров инвертора сварочного тока ИСТ-201 при сохранении остальных технических характеристик неизменными, снижение себестоимости.

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Явление магнитного дутья при дуговой сварке

При сварке конструкций из металла часто возникает необходимость устранения эффекта “магнитного дутья”. Проявление данного эффекта препятствует нормальному процессу сварки (нестабильность горения дуги, разбрызгивание расплавленного металла), что приводит к образованию дефектов в сварном соединении. Это связано с воздействием на сварочную дугу магнитных полей от посторонних источников, вызывающих намагниченность свариваемого металла. Магнитное поле сварочной дуги, взаимодействуя с магнитным полем от посторонних источников, создаёт результирующее поле, приводящее к отклонению сварочной дуги от оси электрода под действием силы  $F_1$  (рисунок 1.1). Особенно сильное влияние внешних магнитных полей проявляется в зоне разделки кромок, а именно при сварке корня шва. При сварке последующих слоев магнитный поток шунтируется металлом ранее выполненных проходов [1, 2].

Результаты некоторых исследований [1, 2] свидетельствуют о том, что сварка обычно происходит нормально в диапазоне значений магнитной индукции внешнего магнитного поля не более 2 мТл. Влияние магнитного поля на процесс сварки заметно проявляется в диапазонах индукции от 2 до 4 мТл. Наличие магнитного поля с индукцией более 4 мТл приводит к нарушению процесса сварки, отклонению дуги от оси электрода вплоть до обрыва.

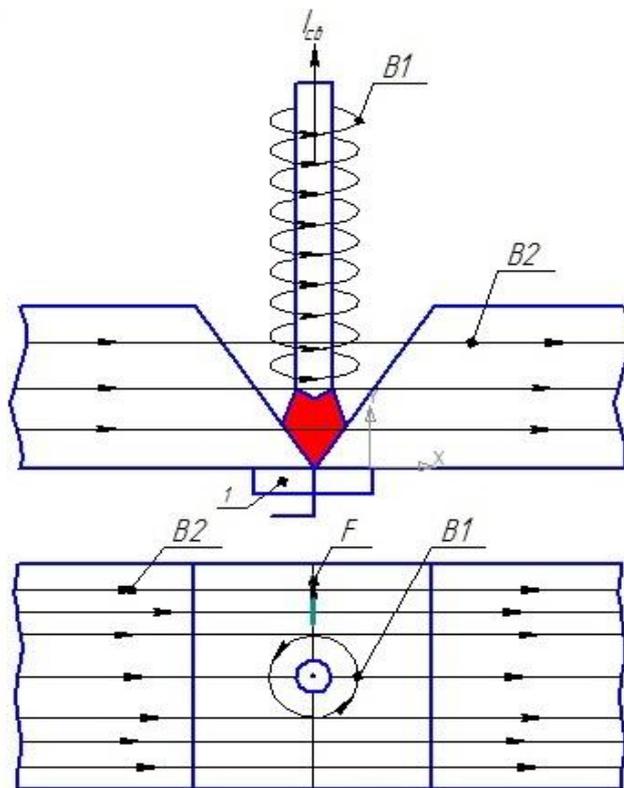


Рисунок 1.1 - Схема возникновения эффекта магнитного дутья, при взаимодействии собственного магнитного поля дуги ( $B1$ ) и магнитного поля изделия ( $B2$ ): 1 – контакт подвода тока к изделию;  $I_{св}$  – сварочный ток;  $F$  - результирующая сила, действующая на сварочную дугу в зоне взаимодействия двух полей

## 1.2 Способы устранения эффекта магнитного дутья

Существует несколько подходов, позволяющих устранить или временно компенсировать магнитное поле в ферромагнитных изделиях [1, 2]:

- использование переменного тока для питания дуги;
- использование магнитных экранов;
- использование компенсирующих внешних магнитных полей;
- размагничивание деталей перед сваркой;
- использование шунтирования магнитных полей.

Анализ эффективности этих способов показал, что они имеют определенные недостатки, ограничивающие возможность их широкого применения.

Так, применение переменного синусоидального тока ограничивается невозможностью использования электродов с основным типом покрытия. Использование магнитных экранов и шунтирование магнитных полей не позволяет полностью устранить влияние внешних магнитных полей. Кроме того, использование компенсирующих магнитных полей, помимо описанных выше недостатков, ограничивает зону сварки и мешает работе сварщика, из-за того, что приходится устанавливать компенсирующие магниты, тем самым резко повышают возможность образования дефектов.

Размагничивание свариваемых конструкции не всегда возможно из-за больших габаритов частей свариваемого изделия или наличия специально намагниченных частей конструкции.

Использование эффекта принудительного шунтирования магнитных полей не обеспечивает полного устранения влияния внешнего магнитного поля на дугу в зоне сварки.

Применение этих подходов влечёт за собой необходимость использования дополнительных размагничивающих устройств и приспособлений (часто достаточно дорогих), а также приводит к включению в технологический процесс получения сварного соединения дополнительных операций, или даже целых дополнительных технологических процессов.

Основу существующих подходов составляет принцип наложения на зону сварки третьего (компенсирующего) магнитного поля, которое создаётся с помощью дополнительных технических устройств: соленоидов с током, постоянных магнитов и прочих.

В работах И.М. Ковалева, А.И. Акулова, Г.Б. Сердюка, И.А. Бачелиса и др. [3-7] исследованы вопросы воздействия внешних управляющих магнитных полей на дугу. В этих работах предложены различные физические модели и расчетные формулы, позволяющие описывать поведение дуги. Из этих работ

следует, что наиболее существенное влияние на пространственную устойчивость дуги оказывают: величина тока горения дуги и её длина, напряженность магнитного поля и расход защитного газа.

### 1.3 Влияние поперечного магнитного поля на пространственное положение сварочной дуги

В 1960 г. Г.Б. Сердюк [3] предложил электрогазодинамическую модель, описывающую происходящие явления при управлении сварочной дугой поперечным магнитным полем. Он показал, что при управлении поперечным магнитным полем возникают 2 случая. В первом случае возможно перемещение как катодного, так и анодного пятна по поверхностям электродов (такое возможно в случае использования плоских электродов). Такую дугу он предложил называть «Дугой с магнитным перемещением». Во втором случае возможно перемещение только анодного пятна (или катодного на обратной полярности), в связи с чем возникает деформация столба дуги. Этот случай было предложено называть «Дуги с магнитным перемещением».

В первом случае предлагается рассматривать дугу как прямолинейный газообразный проводник с особыми физическими свойствами, который при перемещении через газовую среду испытывает противодействие аэродинамических сил сопротивления.

В работе [3] отмечено, что столб дуги ведет себя как гибкий газообразный проводник, «закрепленный» на катоде и «свободный» на аноде. Анодное пятно перемещается благодаря плавному деформированию столба дуги под электродинамическим воздействием поперечного поля. На рисунке 1.2 показан процесс деформирования дуги. Видно, что ось столба дуги деформируется по плавной кривой, близкой с некоторыми допущениями к части окружности. Авторы работы [3] объясняют характер деформации влиянием вынужденного газового потока столба дуги, направленного в обычных условиях от катода на анод. Поэтому деформация начинается у катода

и все время увеличивается к аноду по мере того, как передвигается смещенная магнитным полем плазма столба дуги в струе газового потока.

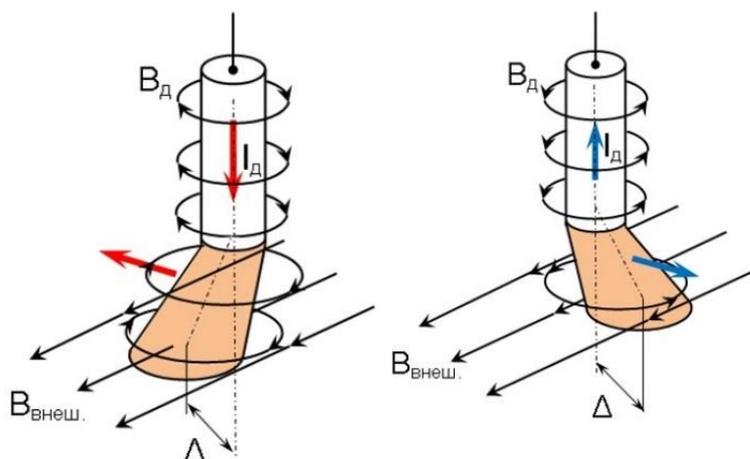


Рисунок 1.2 – Процесс деформирования сварочной дуги под действием внешнего магнитного поля

Такое же явление наблюдается при воздействии поперечного переменного магнитного поля. При этом отклонение столба дуги зависит от напряженности магнитного поля в конкретный момент времени. Отклонения с некоторым запозданием, вызванным сопротивлением среды перемещению столба дуги.

#### 1.4 Дуга как модель упругого тела

В работе [4] предложена модель «упругого тела» для расчета отклонения сварочной дуги в постоянном поперечном магнитном поле. Для нахождения закона перемещения анодного пятна по поверхности электрода автор делает ряд допущения (рисунок 1.3).

Во-первых, дугу следует рассматривать как прямолинейный проводник постоянного сечения, способный поворачиваться вокруг точки  $O$  (центра катодного пятна) с одновременным увеличением до размера  $OA$ .

Во-вторых, столб дуги рассматривается как проводник, обладающий свойствами твердого тела. В связи с этим центром приложения сил,

действующих на столб, будем считать его центр масс – точку М с координатами  $x = x_a/2$ ;  $y = l_0/2$ .

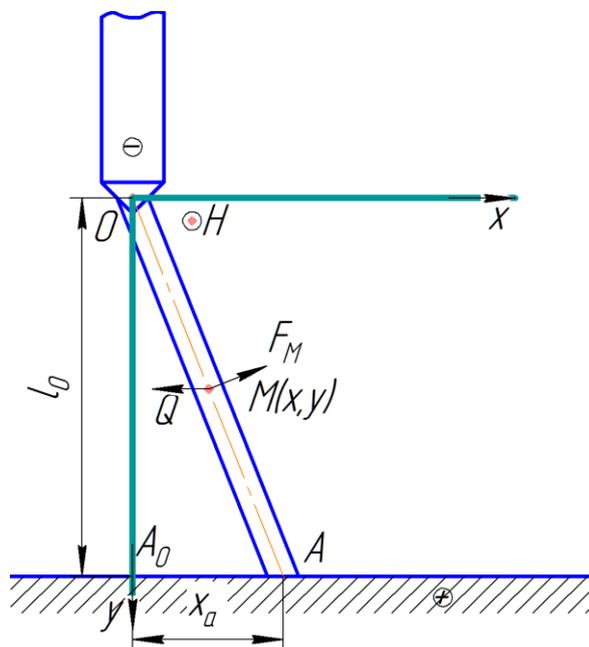


Рисунок 1.3 – Упрощенная расчетная модель сварочной дуги в поперечном магнитном поле

Такое возможно при пренебрежении процессами микро-кинетического порядка, происходящими в столбе дуги при одновременном воздействии электрического и магнитного полей.

Автором работы [4] сделано предложение, что деформированный столб дуги имеет квазиупругие свойства, которые при отклонении пытаются вернуть дугу в первоначальное положение, что позволяет по аналогии с механикой ввести понятие жесткости столба дуги. В этом случае, очевидно, восстанавливающую силу  $Q$  можно рассматривать как упругую силу, пропорциональную деформации  $X$  точки ее приложения:

$$Q = k \cdot X \quad (1.1)$$

где  $X$  – жесткость столба дуги, постоянный коэффициент, не зависящий от положения столба в пространстве, но зависящий в общем случае от природы дуги (род тока, материал электродов и защитной среды, и т.п.) и от параметров, определяющих ее режим (ток дуги и величина дугового промежутка).

С учетом сделанных допущении уравнение статического равновесия столба дуги, выраженное через моменты действующих сил относительно точки О, имеет вид:

$$F_M \cdot OM - Q \cdot OM_0 = 0 \quad (1.2)$$

где  $F_M$  – электромагнитная сила.

Это позволяет получить выражения для определения критической напряженности магнитного поля  $H_{кр}$  и соответствующую ей величину перемещения анодного пятна:

$$H_{кр} = \frac{K}{4 \cdot \mu \cdot I_D}, \quad (1.3)$$

$$X \cdot a_{кр} = l_0 \quad (1.4)$$

где  $K$  – коэффициент жесткости, определяющийся по формуле:

$$K = \mu_0 \cdot C \cdot \frac{I_D^2}{l_0} \quad (1.5)$$

где  $C$  – безразмерный коэффициент зависящий только от природы дуги.

С учетом (5) формула (3) приобретает вид:

$$H_{кр} = \frac{C \cdot I_D}{4 \cdot l_0}, \quad (1.6)$$

Из (1) - (6) можно выразить формулу для расчета перемещения анодного пятна:

$$x_a = \frac{C}{4} \cdot \frac{I_D}{H} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{4}{C} \cdot \frac{H \cdot l_0}{I_D} \right)^2} \right], \quad (1.7)$$

Расчетные и экспериментальные результаты зависимости смещения анодного пятна от напряженности магнитного поля ( $f = x_{a_{кр}}(l_0)$ ) приведены на рисунке 1.4.

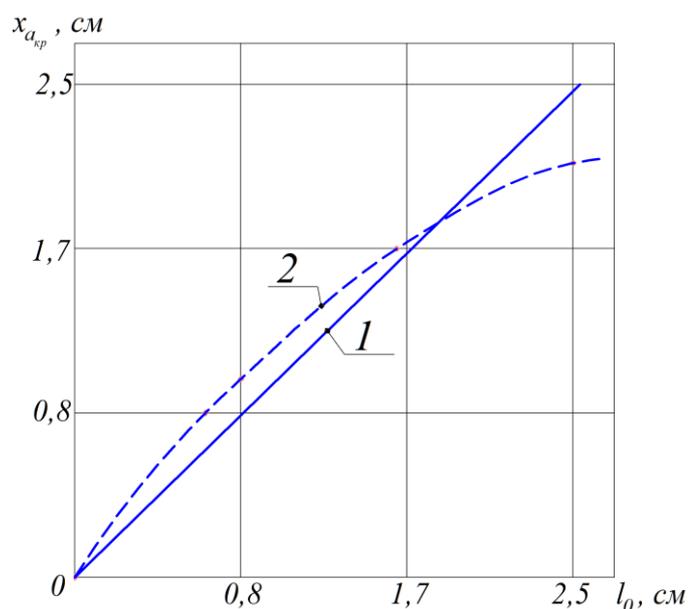


Рисунок 1.4 – Расчетная и экспериментальная зависимости смещения анодного пятна от напряженности магнитного поля

### 1.5 Применение переменного тока для сварки намагниченных деталей

Согласно исследованиям, проведенным в работах [1, 2], для того, чтобы уменьшить влияние внешнего магнитного поля на столб дуги возможно использование переменного тока. В работе [8] показано, что действие магнитного дутья значительно ослабляется при сварке на переменном токе. В этом случае под действием магнитного поля тока, пронизывающего изделие сплошного сечения, в последнем наводится ЭДС  $E_v$ , порождающая вихревые токи  $I_v$ . Сдвиг фаз  $\varphi_v$  между  $I_v$  и  $E_v$  определяется соотношением индуктивной ( $R_L$ ) и активной ( $R_a$ ) составляющих сопротивлений контуров вихревых токов. Поскольку  $R_a > 0$ , то  $\varphi_v < \pi/2$ .

Принципиальный вид векторной диаграммы токов и магнитных потоков, действующих в массивном изделии при сварке на переменном токе, приведен на рисунке 1.5.

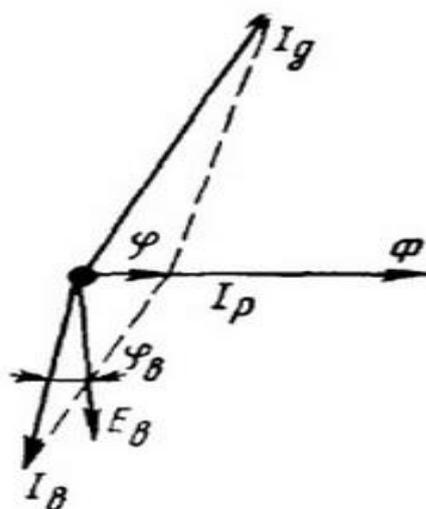


Рисунок 1.5 – Векторная диаграмма токов и магнитных потоков

Диаграмма показывает, что результирующий ток  $I_p$  меньше  $I_d$ , поэтому создаваемый им магнитный поток  $\Phi$  также существенно ниже потока, создаваемого постоянным током, когда вихревые токи отсутствуют. Кроме того, между  $\Phi$  и  $I_d$  существует заметный сдвиг фаз  $\varphi$ , что также уменьшает эффект магнитного дутья, поскольку при  $I_d = I_{\max}$  мал магнитный поток  $\Phi$  и наоборот. В итоге даже при очень больших переменных токах (1000— 2000 А) действие магнитного дутья незначительно.

В ряде работ [13] для осуществления процесса сварки покрытыми электродами в условиях возмущающего действия магнитного поля предложено использовать переменный синусоидальный ток с частотой до 13 кГц. Однако в этом случае частоту переменного тока предлагается определять экспериментальным путем, так как расчетные методы не учитывают всех факторов (длина дуги, способ сварки, конфигурация сварного соединения и др.).

Из описанного выше следует вывод, что существует возможность стабилизации процесса дуговой сварки покрытыми электродами в зоне действия возмущающего магнитного поля посредством применения переменного тока для питания сварочной цепи, однако до настоящего времени такой способ борьбы с возмущающим воздействием магнитного поля распространения не получил. Это обусловлено отсутствием исследований

влияния параметров режима горения дуги переменного тока на стабильность процесса сварки покрытыми электродами в зоне действия возмущающего магнитного поля и как следствие конкретных требований к источникам питания для реализации этого процесса. Но такое решение проблемы дуговой сварки покрытыми электродами в условиях намагниченности является перспективным, так как не требует применения дополнительных устройств для снижения индукции магнитного поля.

## 1.6 Особенности сварки на переменном токе

Особенностью процесса горения дуги на переменном токе является её периодическое гашение при смене полярности питающего напряжения и последующее повторное зажигание. При этом надежность повторного зажигания дуги переменного тока определяет саму возможность процесса сварки.

Процесс смены полярности горения дуги переменного тока характеризуется наличием естественных бестоковых пауз ( $t_3$ , рисунок 1.6), в течение которых ток через межэлектродный промежуток не протекает. В это время происходит охлаждение межэлектродного промежутка, и как следствие снижается степень его ионизации. Последующее повторное зажигание происходит при напряжении ( $U_3$ , рисунок 1.6) как правило, превышающее горение дуги, величина которого определяется составом покрытия электродов и защитной атмосферы, длительностью бестоковой паузы, температурой поверхности электродов и другими параметрами [8, 10].

Напряжение повторного зажигания дуги переменного тока промышленной частоты, горящей между стальными электродами в воздухе при бестоковой паузе 0,15...0,18 мс составляет 100...120 В, при увеличении паузы до 10 мс напряжение повторного зажигания дуги превышает 250 В [14].

Поэтому применение источников питания переменного тока с максимальным разрешенным напряжением холостого хода 80 В не

обеспечивает стабильного горения дуги при сварке электродами с покрытием основного типа [15].

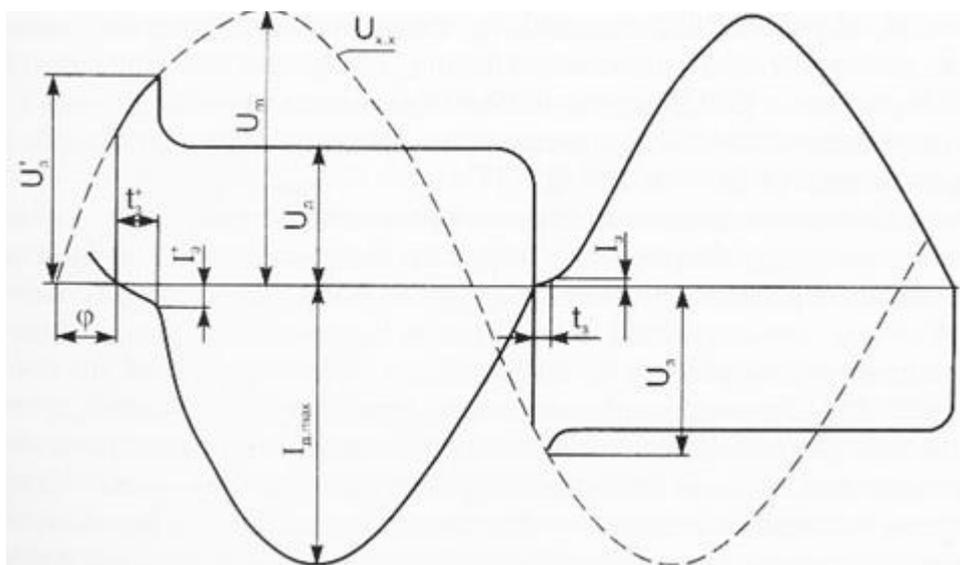


Рис. 1.6 – Временные диаграммы изменения тока в сварочной цепи ( $i_d$ ) и напряжения на межэлектродном промежутке ( $U_d$ ) при горении дуги переменного синусоидального тока.

Основными способами повышения устойчивости горения дуги переменного тока при сварке покрытыми электродами являются [11]:

- активирование покрытия электродов легкоионизирующимися добавками;
- легирование стержня электрода редкоземельными элементами;
- применение электродов с многослойным покрытием;
- сокращение бестоковой паузы в процессе коммутации направления тока в сварочной цепи;
- повышение напряжения холостого хода;
- применение генераторов высоковольтных (более 1000 В) высокочастотных разнополярных затухающих по амплитуде импульсов напряжения для пробоя межэлектродного промежутка;
- применение генераторов низковольтных (до 1000 В) импульсов напряжения.

В работе [17] подробно рассмотрен каждый способ и сделан вывод о том, что наиболее предпочтительным является метод сокращения бестоковой паузы в процессе коммутации направления тока в сварочной цепи. При этом обязательным условием является применением генераторов высоковольтных (более 1000 В) высокочастотных разнополярных затухающих по амплитуде импульсов напряжения для пробоя межэлектродного промежутка. Данный способ обеспечивает не только хорошее повторное зажигание дуги при смене полярности, но и возможность повторного зажигания дуги после длительного перерыва в её горении и при «холодных» электродах в начале процесса сварки.

### 1.7 Источники питания для сварки на переменном токе

В наши дни для питания сварочной дуги переменным током применяются различные типы источников. Наиболее распространены из них сварочные трансформаторы и установки для аргодуговой сварки неплавящимся электродом. Минусом сварочных трансформаторов является синусоидальная форма тока в сварочной цепи и, как следствие, значительная бестоковая пауза в моменты смены полярности тока, а также принципиальная невозможность изменения частоты переменного тока. В некоторых промышленных установках, например, ТИР-300, решена проблема преобразования синусоидального тока в переменный прямоугольный, что снижает величину бестоковой паузы до 50 мкс. Однако возможность управления частотой смены полярности отсутствует.

Повышение частоты переменного тока с возможностью смены полярности в произвольный момент реализуется с помощью полупроводникового инвертора. Основной элементной базой для построения инверторов на сегодняшний день являются мощные полностью управляемые полупроводниковые ключи на IGBT-транзисторах. Номенклатура которых включает в себя устройства на токи от 10 до 1200 А с рабочим напряжением до 6500 В, что позволяет реализовать инвертор сварочного тока на их основе.

Наибольшее распространение получили мостовые и полумостовые схемы преобразователя. Для питания полумостового инвертора необходимо два источника питания, в то время как для мостовой схемы требуется только один источник питания при удвоенном количестве ключей. Таким образом мостовая топология инвертора является более предпочтительной, так как позволяет использовать в качестве основного источника питания любой сварочный генератор или выпрямитель.

Независимо от схемы инверторного сварочного выпрямителя, в его состав всегда входит сглаживающий дроссель, который используется для сглаживания тока в цепи нагрузки. Однако наличие дросселя снижает скорость нарастания и спада тока в сварочной цепи, что не позволяет формировать переменный прямоугольный тока с частотой выше 200 Гц.

Таким образом возникает необходимость разработки принципиально нового схемного решения на базе мостовой топологии инвертора, которое должно обеспечивать стабильное горение дуги переменного прямоугольного тока с высокой скоростью нарастания и спада тока сварочной цепи.

## 1.8 Разработка инвертора для сварки намагниченных деталей

Исходя из существенных преимуществ систем питания дуги, основанных на принципе преобразования постоянного тока в переменный прямоугольный, а также на основе данных, представленных в зарубежной и отечественной литературе, сотрудниками кафедры сварки Томского политехнического университета была разработана схема инвертора сварочного тока для преобразования постоянного тока в переменный прямоугольный[17]. Функциональная схема инвертора представлена на рисунке 1.7.

В состав инвертора входят:

- блок управления инвертором 1;
- блок осциллятора 2;
- электрододержатель 3;

- изделие 4;
- сварочный выпрямитель или генератор с падающей ВВАХ 5;
- вспомогательный диод VD1;
- стабилитрон (ограничитель перенапряжений) VD6;
- вспомогательный транзистор VT1;
- обратные диоды инвертора VD2...VD5;
- транзисторы инвертора VT2...VT5;
- импульсный трансформатор осциллятора TV.

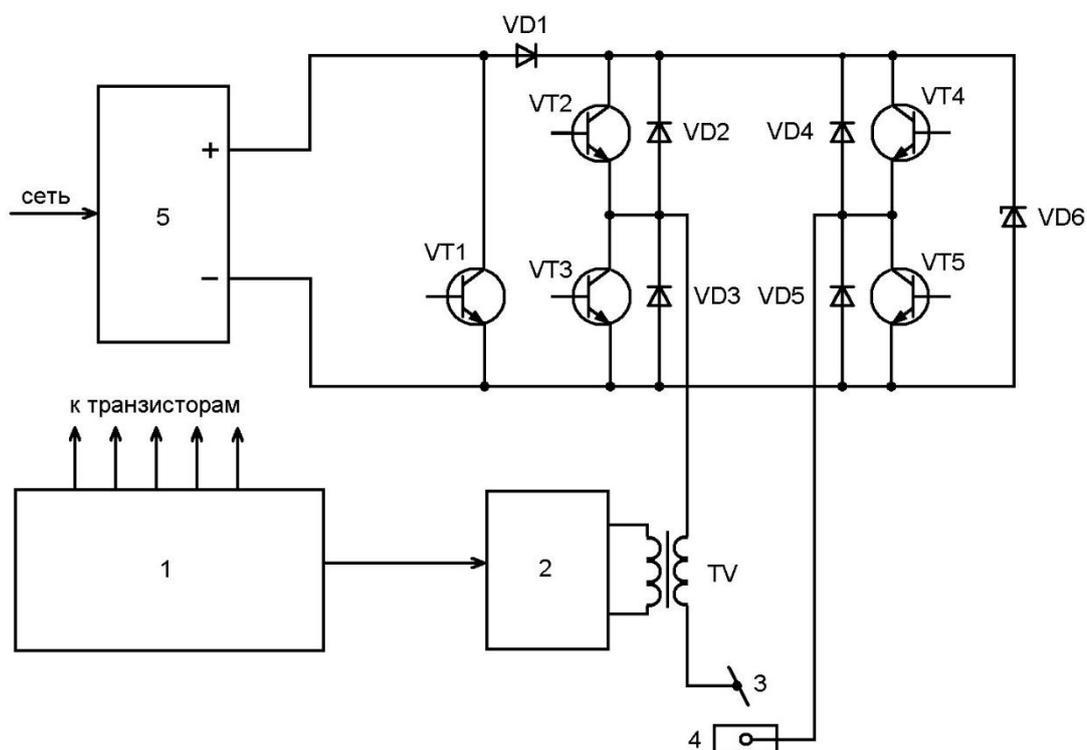


Рис. 1.7 - Функциональная схема транзисторного инвертора.

Схема работает следующим образом: в период горения дуги прямой полярности открыты транзисторы инвертора VT4 и VT3. При этом ток протекает по цепи: сварочный выпрямитель 5 (клемма "+") → вспомогательный диод VD1 → транзистор VT4 → дуга между изделием 4 и электродом 3 → обмотка импульсного трансформатора TV → транзистор VT3 → сварочный выпрямитель 5 (клемма "-").

По истечении времени горения дуги прямой полярности блок управления 5 обеспечивает выключение транзисторов инвертора VT3 и VT4, и

включение вспомогательного транзистора VT1. В этот момент времени, ток сварочного источника питания 5 начинает протекать по цепи: сварочный выпрямитель 5 (клемма «+») → вспомогательный транзистор VT1 → сварочный выпрямитель 5 (клемма «-»).

Энергия, накопленная в индуктивности сварочного контура, не позволяет мгновенно уменьшиться до нуля величине протекающего через сварочную цепь электрического тока. Благодаря наличию вспомогательного диода VD2, ток в сварочной цепи начинает протекать по следующим элементам: обмотка импульсного трансформатора TV → обратный диод VD2; стабилитрон VD6 → обратный диод VD5 → дуга между изделием 4 и электродом 3.

Так как напряжением пробоя стабилитрона VD6 можно варьировать в широких пределах существует возможность управлять временем спада тока в сварочном контуре. Одновременно с описанными процессами, блок управления 5 формирует сигнал «накачки» осциллятора 2, при этом магнитопровод импульсного трансформатора TV перемагничивается током в первичной обмотке до насыщения таким образом, чтобы магнитный поток по направлению совпадал с магнитным потоком создаваемым током во вторичной обмотке при горении дуги обратной полярности. После того как ток в сварочной цепи достигнет нулевой величины, данный этап завершается.

Следующий коммутационный интервал начинается с того, что, блок управления 1 обеспечивает включение транзисторов инвертора VT2 и VT5, и выключение вспомогательного транзистора VT1, одновременно с этим так же выключается сигнал «накачки» осциллятора 2. Ток протекающий по цепи: сварочный выпрямитель 5 (клемма «+») → вспомогательный транзистор VT1 → сварочный выпрямитель 5 (клемма «-») начинает протекать по цепи сварочный выпрямитель 5 (клемма «+») → вспомогательный диод VD1 → стабилитрон VD6 → сварочный выпрямитель 5 (клемма «-»).

Одновременно с этим напряжение стабилизации на VD6 прикладывается к входу инвертора. В момент отключения блоком управления 1 сигнала

«накачки» осциллятора 2, на вторичной обмотке импульсного трансформатора TV за счет ЭДС самоиндукции формируется импульс высокого напряжения, который обеспечивает пробой межэлектродного пространства 4, 5 и возбуждение дуги обратной полярности. За счет того, что напряжение пробоя стабилитрона VD6 значительно выше, чем напряжение холостого хода сварочного выпрямителя 5, скорость нарастания тока в сварочной цепи до величины протекающей через стабилитрон VD6 пропорционально увеличивается.

В работе [17] приведено подробное описание математической модели мостового транзисторного инвертора, и показано, что она достоверно отражает электромагнитные коммутационные процессы. Таким образом, полученные математические выражения могут быть использованы при проектировании транзисторного инвертора постоянного тока в переменный прямоугольный с оптимизированными параметрами.

## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Дуговая сварка занимает ведущее место в сварочном производстве. Повышения качества и производительности при изготовлении сварных конструкций можно достичь как путем совершенствования и разработки новых технологических процессов дуговой сварки, так и результате роста уровня механизации и автоматизации сварочных работ. Важнейшая роль в этом принадлежит разработке и освоению в производстве оборудования, отвечающего современным требованиям [9].

В отличие от обычных потребителей электроэнергии (лампы накаливания, электродвигатели, печи сопротивления и др.) электрическая дуга имеет следующие особенности:

- для зажигания дуги требуется напряжение значительно более высокое, чем для поддержания ее горения;
- дуга горит с перерывами, во время которых происходит либо разрыв электрической цепи, либо короткое замыкание.

Во время горения дуги с изменением ее длины меняются напряжение и сила тока. При коротком замыкании в момент зажигания и переходе капли расплавленного электродного металла на заготовку напряжение дуги падает до значений, близких к нулю.

На сегодняшний день ручная дуговая сварка покрытыми электродами является наиболее распространенным способом при строительстве и ремонте трубопроводов, так как позволяет производить сварку в любых пространственных положениях и труднодоступных местах, а применяемое при этом оборудование отличается надежностью и простотой обслуживания, что является немаловажным фактором в полевых условиях [9]. Оборудование для дуговой сварки электродами с покрытием является наиболее распространенной группой, в которую входят трансформаторы, агрегаты, преобразователи и выпрямители. Выпускается ряд источников сварочного тока, обеспечивающих сварку всеми типами покрытых электродов разнообразных видов соединений

сталей на токах до 500 А. Благодаря технологической гибкости ручной дуговой сварки покрытыми электродами, возможности сварки в различных пространственных положениях и простоте организации работ эти источники широко применяются в промышленности, строительстве, в монтажных и сложных климатических условиях.

Основной объем работ выполняется электродами диаметром от 2 до 6 мм, и лишь в небольшом количестве используются электроды меньшего или большего диаметра.

Основными техническими показателями источников питания дуги являются внешняя характеристика, напряжение холостого хода, относительная продолжительность работы и относительная продолжительность включения при прерывистом режиме.

Для ручной дуговой сварки, когда статическая характеристика дуги жесткая, внешняя характеристика источника питания должна быть крутопадающей. Чем больше крутизна падения внешней характеристики источника, тем меньше колебания тока при изменении длины дуги. При таких характеристиках напряжение холостого хода источника питания всегда больше напряжения дуги, что облегчает первоначальное и повторные зажигания дуги, особенно при сварке на переменном токе. Кроме того, при крутопадающей внешней характеристике ограничивается ток короткого замыкания, который находится в пределах 1,25 — 2 рабочего тока.

На основании этих особенностей сформулированы перечисленные ниже требования к источникам питания, которые должны обеспечить три режима — рабочий, холостого хода и короткого замыкания.

1. Напряжение холостого хода на зажимах источника питания (при разомкнутой сварочной цепи) должно в 2 - 3 раза превышать напряжение горения дуги и быть достаточным для её легкого возбуждения, но в то же время его значение не должно быть больше допустимого, безопасного для сварщика. Максимальное напряжение холостого хода установлено в следующих пределах:

для источников переменного тока — до 80 В; для источников постоянного тока — до 110 В.

2. Величина сварочного тока определяется размером и толщиной свариваемых заготовок. Необходимо, чтобы источник питания был оснащен устройством для плавного регулирования силы тока.

Каждый источник питания рассчитывают на определенную нагрузку, при которой он работает, не перегреваясь выше допустимых норм. Ток и напряжение источника при которых он работает в данном режиме не перегреваясь, называются номинальными. Номинальное значение сварочного тока различно при разных режимах работы источника питания (перемежающийся или повторно-кратковременный режимы). Режим работы характеризуется отношением длительности сварки к сумме длительности сварки и длительности холостого хода и выражается в процентах. Перемежающийся режим характеризуется относительной продолжительностью нагрузки за время цикла (ПН), определяемой по формуле:

$$ПН = \frac{N}{N + V} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

где N – время работы;

V – время холостого хода.

Очевидно, что во время холостого хода электротехническое устройство не отключается от питающей сети. Перемежающийся режим работы используется в сварочных устройствах для ручной дуговой сварки покрытыми электродами.

В соответствии с ГОСТ 15150-69 «Исполнение для различных климатических районов» сварочное оборудование изготавливается для эксплуатации в определенных климатических условиях. Основными характеристиками климатических условий эксплуатации сварочного оборудования являются температура окружающего воздуха, относительная влажность, атмосферное давление. В таблице 1 приведены обозначения

условий эксплуатации, транспортирования и хранения электросварочного оборудования, а также допустимые величины основных факторов воздействия.

Таблица 1 - Условия эксплуатации, транспортирования и хранения электросварочного оборудования[9]

Вид оборудования	Климатические факторы						Механические факторы		
	При эксплуатации			При транспортировании		При хранении		При эксплуатации	При транспортировании
	Климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69	Диапазон температур, °С	Среднемесячная относительная влажность, %	Диапазон температур, °С	Среднемесячная относительная влажность, %	Диапазон температур, °С	Среднемесячная относительная влажность, %	Вид воздействия	Вид воздействия
Выпрямители для ручной дуговой сварки	У3	+40 ... -10	80 при 20°С	+50 ... -50	80 при 20°С	+40 ... +5	65 при 20°С	Вибрации с ускорением 0,5g в диапазоне частот 1 – 35 Гц	Перевозки различными видами транспорта с числом перегрузок не более 4

Исходя из приведенных выше условия эксплуатации, транспортировки и хранения оборудования для ручной дуговой сварки, можно сделать вывод, что разрабатываемое оборудование должно выдерживать работу в диапазоне температур от -10 до +40°С.

При строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов согласно РД 25.160.00 – КТН011-10 величина сварочного тока при ручной дуговой сварке не превышает 170 А. Поэтому оборудование, реализующее способ дуговой сварки покрытыми электродами переменным прямоугольным током намагниченных деталей трубопроводов должно быть рассчитано на номинальное значение сварочного тока 200 А.

Кроме того, для удобства эксплуатации в условиях строительства магистральных трубопроводов оборудование не должно содержать в себе сложных электронных компонентов, а его компоновка должна обеспечивать легкий доступ ко всем составным частям при ремонте.

Конструкция инверторного источника сварочного тока предполагает, что он будет выполнен в качестве приставки к любому источнику питания для ручной дуговой сварки.

## 2.1 Конструкция инвертора сварочного тока

Сварочный инвертор — это устройство, преобразующее постоянное напряжение в переменное. Инвертор представляет собой блок силовых электрических схем, в основу которых заложены транзисторы IGBT и стабилизирующего дросселя для уменьшения пульсаций выпрямленного тока. Схема инвертора сварочного тока представлена на рисунке 1.7.

Преимуществом инверторного источника питания является улучшение динамической характеристики дуги при сварке на переменном прямоугольном токе в условиях возмущающего действия магнитного поля. Использование инверторных технологий приводит к улучшению качественного показателя сварочной дуги, повышению КПД, минимальному разбрызгиванию при сварке, позволяет реализовать плавные регулировки сварочных параметров.

Основными составными частями инвертора, для которых необходимо произвести расчет, являются:

- блок варисторов;
- транзисторы;
- радиатор системы охлаждения;
- вентиляторы принудительного охлаждения;

## 2.2 Выбор транзисторов для инвертора сварочного тока

Для надежной и продолжительной работы сварочного инвертора необходимо выполнить тепловой расчет режима работы электронных компонентов, а также рассчитать и спроектировать систему воздушного охлаждения.

Наиболее ответственными и уязвимыми элементами выпрямителя с инвертором являются силовые переключающие полупроводниковые приборы – транзисторы.

Транзистор – полупроводниковый прибор обычно с тремя выводами, позволяющий входным сигналом управлять током в электрической цепи. Используется главным образом для усиления, генерации и преобразования электрических сигналов. На принципиальных схемах обозначается «VT».

Анализ литературных данных показал, что при сварке магистральных трубопроводов максимальное значение сварочного тока не превышает 200 А. Следовательно, полупроводниковые ключи инвертора сварочного тока должны быть рассчитаны на номинальный ток 300 А, что соответствует коэффициенту запаса равному 1,5.

В работе [17] показано, что максимальное напряжение, прикладываемое в процессе работы к полупроводниковым ключам не превышает 300 В. Анализ номенклатуры силовых полупроводниковых приборов показал, что стандартный ряд полупроводниковых ключей выглядит следующим образом: 600; 1200; 1700; ...; 10000 В. Поэтому выбираем ближайшее значение 600 В.

В исходной конструкции ИСТ-201в качестве полупроводниковых ключей используются IGBT-модули CM300DY–12NF (Mitsubishi, Япония).

Таблица 2 – Технические характеристики транзистора CM300DY–12NF

Номинальный ток, А	300
Максимальная рассеиваемая мощность, Вт	780
Номинальное напряжение, В	600
Тип исполнения	Модуль
Способ монтажа	На охладителе



Рисунок 2.1 – Общий вид транзистора CM300DY–12NF

В новой конструкции было предложено заменить IGBT-модули CM300DY–12NF на дискретные транзисторы IRGP6690D (International Rectifier, США), характеристики которых представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики транзистора IRGP6690D

Напряжение К-Э максимальное	600 В
Ток коллектора максимальный при 25°С	140А
Ток коллектора максимальный при 100°С	90 А
Напряжение насыщения К-Э	1.65 В
Время нарастания	86 нс
Время спада	53 нс
Время восстановления диода	90 нс
Прямое падение напряжение диода	2.3 В
Температура эксплуатации	-40°С до 175°С



Рисунок 2.2– Общий вид транзистора IRGP6690D

## 2.3 Выбор системы воздушного охлаждения инвертора

Главным эксплуатационным параметром охладителей является установившееся тепловое сопротивление «контактная поверхность охладителя - окружающая среда» (тепловое сопротивление охладителя) –  $R_{thh-cf}$ , поскольку именно оно является определяющим теплоотводящую способность охладителя.

В исходной конструкции ИСТ-201 использовался охладитель серии O55 с принудительным охлаждением (рисунок 2.7, рисунок 2.8), характеристики которого представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные характеристики охладителя для силовых модулей серии O55

Тип охладителя	Габаритные размеры, мм	Контактная поверхность модуля, мм	Количество модулей на охладителе, n	Тепловое сопротивление $R_{thha}$ , °C/Вт		Масса, кг
				Естественное охлаждение	Принудительное охлаждение при 6 м/с	
O55/265	125×265×137	50×92	3	0,292	0,043	5,2

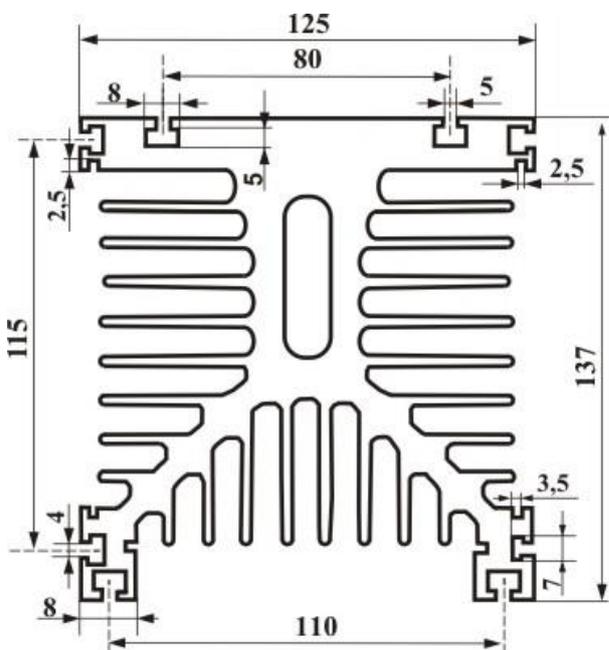


Рисунок 2.3 – Радиатор серии O55 (вид спереди)



Рисунок 2.4 – Общий вид радиатора серии O55

В новой конструкции было предложено заменить радиатор серии O55 на профиля РА – 250 (ЛИГРА, Россия) длиной 125 мм(рисунок 2.5).

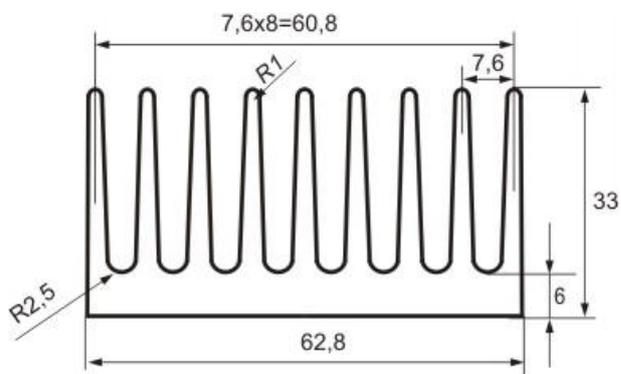


Рисунок 2.5(вид спереди)профиля РА – 250.

Использование лишь одного охладителя не обеспечивает необходимого отвода тепла от охлаждаемых поверхностей. Поэтому для обеспечения нужного охлаждения силовых модулей целесообразно использовать вентиляторы для принудительного охлаждения.

Приняв во внимание компоновку (описана в следующем разделе диссертации) составных частей инвертора сварочного тока был сделан выбор в пользу вентиляторов марки SUNON A2123HBT.GN (рисунок 2.6), технические характеристики которого представлены в таблице 5.



Рисунок 2.6 – Общий вид вентилятора SUNON A2123HBT.GN

Таблица 5 – Общие характеристики вентилятора марки SUNON A2123HBT.GN

Напряжение питания, В	230
Размер вентилятора, мм	120×120×38
Воздушный поток, м <sup>3</sup> /ч	165
Уровень шума, дБ	45
Потребляемая мощность, Вт	23
Скорость вращения, об/мин	2700
Вес, г	525
Номинальный ток, А	0,14
Отклонение потребляемой мощности и тока, %	±15
Частота, Гц	50
Рабочая температура, °С	-10...+70

#### 2.4 Проверка работы транзисторов и системы охлаждения

Для проверки работы транзисторов и системы охлаждения был спроектирован и изготовлен макет силовой части инвертора (рисунок 2.7). Макет состоит из источника питания (Arc-200), вентилятора 1, радиатора охлаждения 2, транзистора 3, платы 4, терминала 5, медной шины 6.

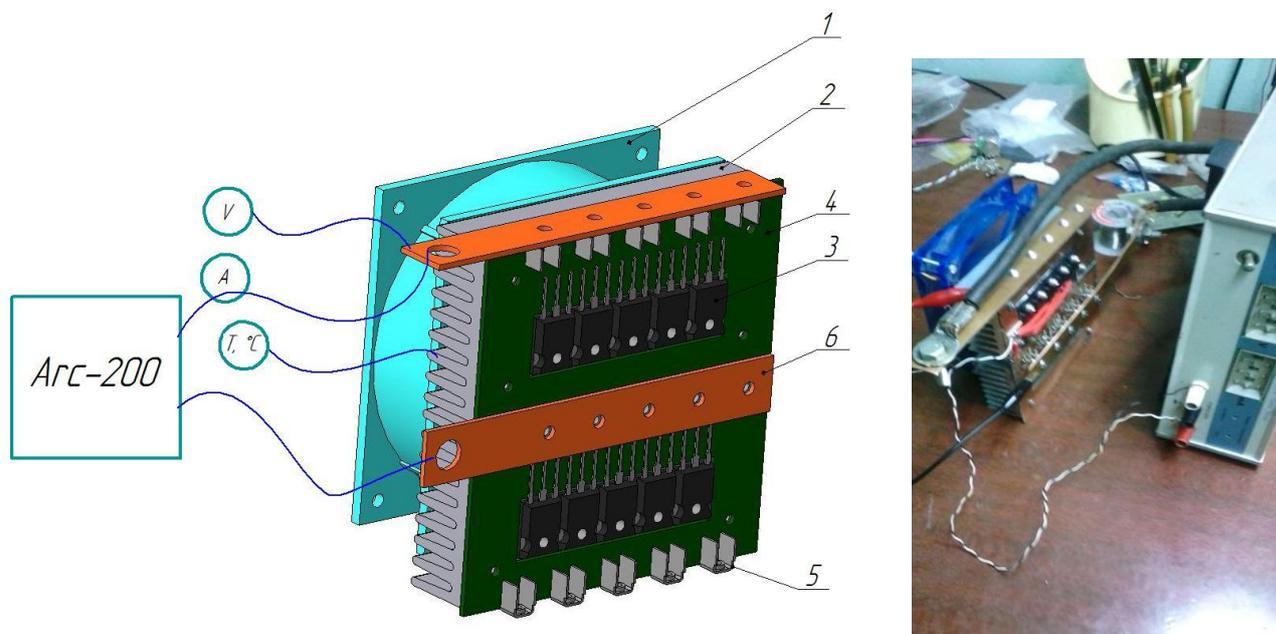


Рисунок 2.7 –Макет силовой части инвертора

От источника питания к макету подавался сварочный ток от 50 до 200 А в течение 10 минут при температуре окружающей среды 25 °С. С помощью термометра снимались показания температуры на радиаторе охлаждения. Результаты эксперимента представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Зависимость температуры радиатора от сварочного тока и напряжения

Сварочный ток, А	Напряжение, В	Температура радиатора, °С
50	0,92	40
100	1,11	66
125	1,19	56
150	1,27	65
175	1,36	75
200	1,45	85

Результаты теплового испытания макета в течение 10 мин. сварочным током величиной 200 А показали, что при температуре окружающей среды 25 °С максимальная температура радиатора не превышала 85 °С, что ниже предельной температуры эксплуатации транзистора 140 °С.

## 2.5 Расчет теплового режима IGBT транзистора

Основным условием надежной работы любого электронного или электротехнического изделия является отсутствие перегрева. Для гарантирования длительной работы необходимо убедиться в отсутствии перегрева компонентов инвертора сварочного тока расчетным способом. Для этого необходимо произвести расчет тепловых сопротивлений при известной рассеиваемой мощности. Основным способом определения максимальной температуры кристалла полупроводниковых приборов является методика, основанная на теории тепловых сопротивлений.

В режиме постоянного тока систему полупроводниковый ключ – охладитель можно представить в виде схемы замещения, состоящей из тепловых сопротивлений, характеризующих процесс теплопередачи в данной конструкции.

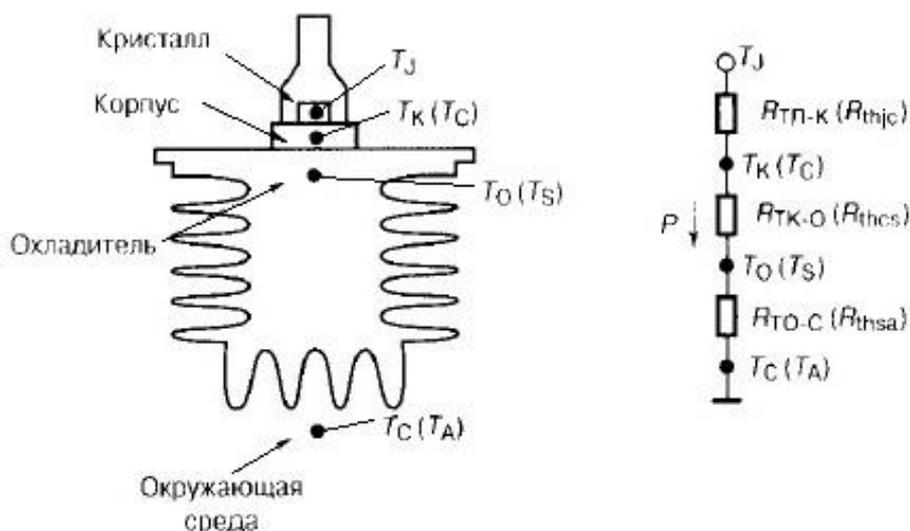


Рисунок 2.8 – Тепловая схема замещения системы ключ – охладитель

Для построения модели, имитирующей отвод тепла, используется электротепловая модель, позволяющая связать перепад температур в системе с потоком мощности потерь  $P_0$ . Используя закон Ома, температуру перехода  $T_J$  можно выразить уравнением [16]:

$$T_J = P_0 \cdot (R_{ThJC} + R_{ThCS}) + T_h \quad (2.2)$$

где  $T_h$  – максимальная температура радиатора при сварочном токе 200 А ;

$R_{ThJC}$  – тепловое сопротивление кристалл – корпус;

$R_{ThCS}$  – тепловое сопротивление корпус – охладитель;

Согласно условиям эксплуатации и хранения электросварочного оборудования, приведенным в таблице 1, максимальная температура окружающей среды при эксплуатации +40<sup>0</sup>С. Из эксперимента (см. п.2.4) найдена максимальная температура радиатора при сварочном токе 200 А при температуре окружающей среды 25 °С  $T_h=85$  °С. Поэтому окончательно принимаем  $T_h=100$  °С.

Тепловая мощность, рассеиваемая любым полупроводниковым прибором определяется по формуле:

$$P = U \cdot I \quad (2.3)$$

где  $U$  – падение напряжения на полупроводниковом приборе, В;

$I$  – величина тока протекающего через полупроводниковый прибор, А

Падение напряжения на IGBT-транзисторе при номинальном токе 200 А определим с помощью графика зависимости напряжения насыщения от тока коллектора (рисунок 2.9). Так как у нас 5 транзисторов включены параллельно, то на одном транзисторе будет протекать сварочный ток  $I = 40$  А.

Из графика видно ( $V_{GE} = 18$ ), что при токе  $I = 40$  А напряжение насыщения составляет  $U = 1,5$  В, следовательно, номинальная мощность составляет:

$$P_0 = I \cdot U = 40 \cdot 1,5 = 60 \text{ Вт}, \quad (2.4)$$

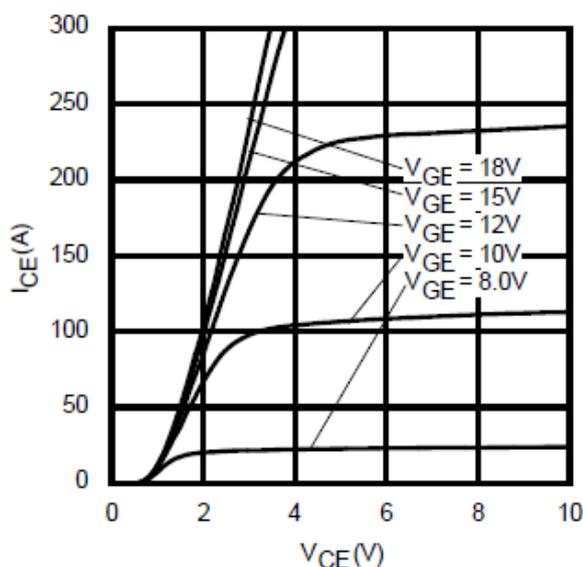


Рисунок 2.9 – График зависимости напряжения насыщения от тока коллектора

Изучив данные о тепловых характеристиках IGBT транзистора, указываем:

тепловое сопротивление кристалл – корпус:  $R_{ThJC} = 0,31^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ,

тепловое сопротивление корпус – охладитель:  $R_{ThCS} = 0,24^\circ\text{C}/\text{Вт}$ .

Подставляем полученные данные в формулу 2.2:

$$T_j = 60 \cdot (0,31 + 0,24) + 100 = 133^\circ\text{C}$$

В результате проведенных расчетов можно сделать вывод, что при максимальной температуре эксплуатации оборудования температура структуры полупроводникового ключа лежит в температурном диапазоне работы ключа, т.е. от  $-40$  до  $+175^\circ\text{C}$ .

## 2.6 Тепловой расчет варисторного блока

Варистор — полупроводниковый резистор, электрическое сопротивление (проводимость) которого нелинейно зависит от приложенного напряжения, то есть обладающий нелинейной симметричной вольт-амперной характеристикой и имеющий два вывода. Имеет свойство резко уменьшать свое сопротивление с единиц ГОм до десятков Ом при увеличении приложенного к нему напряжения выше пороговой величины. При дальнейшем увеличении напряжения сопротивление уменьшается ещё сильнее. Благодаря отсутствию сопровождающих токов при скачкообразном изменении приложенного напряжения, варисторы являются основным элементом для производства устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) [20].

Нелинейность характеристик варисторов обусловлена локальным нагревом соприкасающихся граней многочисленных кристаллов карбида кремния (или иного полупроводника). При локальном повышении температуры на границах кристаллов сопротивление последних существенно снижается, что приводит к уменьшению общего сопротивления варисторов [20].

### 2.6.1 Расчет тепловых потерь в варисторе

Для расчета числа варисторов, необходимых для рассеивания энергии, накопленной в сварочной цепи, нужно рассчитать тепловые потери в одном варисторе. Для этого необходимо рассчитать длительность коммутационных процессов при использовании переменного прямоугольного тока.

На рисунке 2.7 представлен график протекания тока через варистор, где  $t_1$  – длительность протекания тока, накопленного в индуктивности сварочной цепи;  $t_2$  – длительность протекания тока, равного  $(I_{\text{входн.}} - I_{\text{св.цепи}})$ .

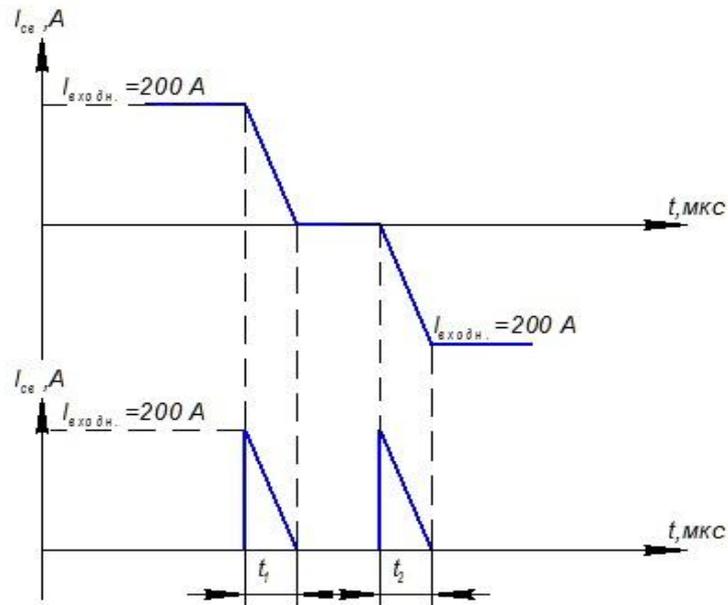


Рисунок 2.10 – Длительность коммутационных процессов при протекании тока через варистор

Исходя из представленного графика можно рассчитать энергию, которая рассеивается на варисторе в момент времени  $t_1$  и  $t_2$ :

$$E_1 = \frac{L \cdot I^2}{2}, \quad (2.9)$$

где  $L$  – индуктивность сварочного контура, Гн (определяется экспериментальным путем  $L = 30 \cdot 10^{-6}$  Гн);

$I$  – ток сварочной цепи, А.

$$E_1 = \frac{30 \cdot 10^{-6} \cdot 200^2}{2} = 0,6 \text{ Дж}$$

$$E_2 = \int_0^t U \cdot I dt \quad (2.10)$$

Необходимо определить, с какой скоростью происходит нарастание тока в индуктивности за 1 секунду:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_{варист}}{L_{св.цепи}} \Rightarrow \frac{300}{30 \cdot 10^{-6}} = 10^7 \text{ A/c} \quad (2.11)$$

Это означает, что ток в сварочной цепи возрастает со скоростью 10 А/мкс.

Определим время, за которой ток в сварочном контуре вырастает до 200 А. Для этого воспользуемся подобием треугольников, т.е. за 1 секунду ток вырастает до 10 МА, тогда до 200 А ток вырастет за время  $t_1$ :

$$\frac{1}{t_1} = \frac{10 \cdot 10^6}{200} \Rightarrow t_1 = t_2 = \frac{200 \cdot 1}{10 \cdot 10^6} = 20 \text{ мкс} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} E_2 &= \int_0^t U \cdot I(t) dt = U \int_0^t I(t) dt = U \int_0^t 10^7 dt = 10^7 \cdot U \int_0^t t dt = \\ &= 10^7 \cdot U \cdot \frac{t^2}{2} = 10^7 \cdot 300 \cdot \frac{(20 \cdot 10^{-6})^2}{2} = 0,6 \text{ Дж} \end{aligned}$$

Получили, что на одном варисторе за время  $t_1$  и  $t_2$  рассеивается одинаковое количество энергии:

$$E = E_1 + E_2 = 0,6 + 0,6 = 1,2 \text{ Дж} \quad (2.13)$$

### 2.6.2 Расчет количества варисторов на блоке

При частоте 500 Гц за 1 секунду в сварочном контуре смена полярности происходит 1000 раз. Тогда суммарная мощность, которую необходимо рассеять блоку варисторов равна:

$$P = (E_1 + E_2) \cdot f = 1,2 \cdot 1000 = 1200 \text{ Вт} \quad (2.14)$$

Согласно документации на варисторы марки JVR10N271K максимальная рассеиваемая мощность одного варистора составляет 1 Вт, поэтому варисторный блок должен содержать количество варисторов не менее 1200 штук.

Проверим, какое количество циклов способны выдерживать варисторы при максимальном токе 200 А. Для этого воспользуемся графиком зависимости максимального импульсного тока от количества циклов (рисунок 2.8).

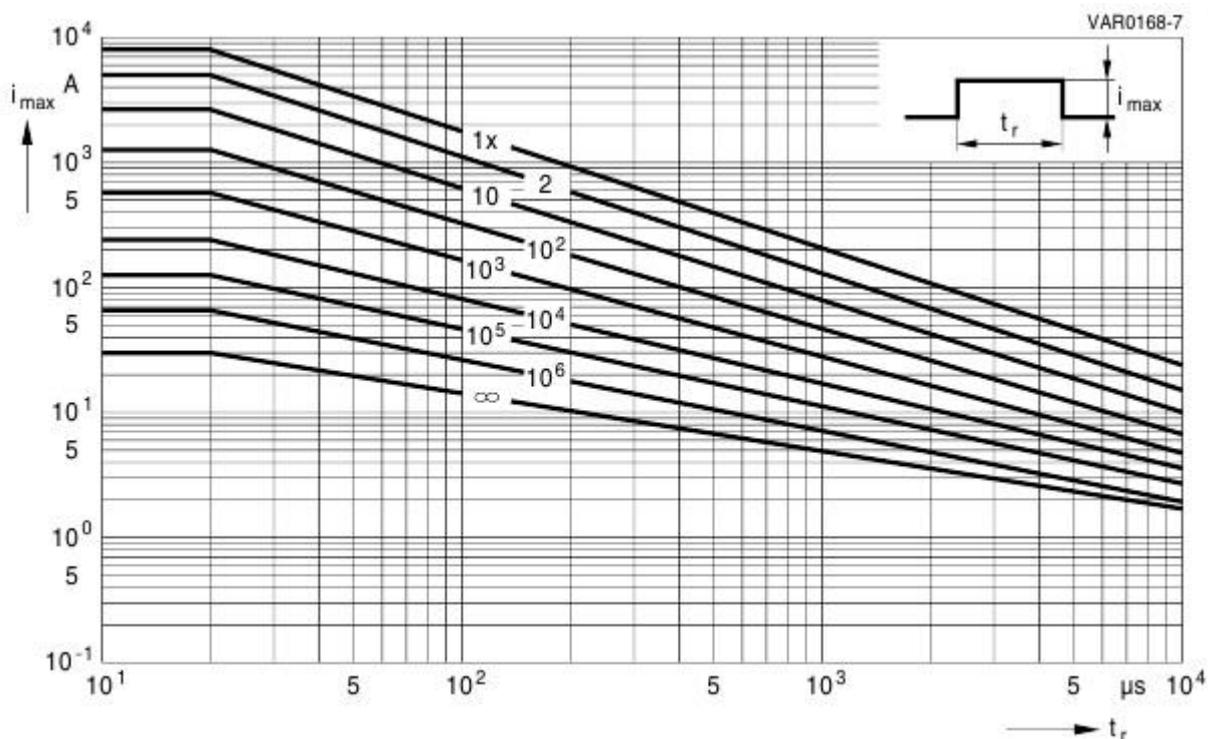


Рисунок 2.11 – График зависимости максимального тока импульса от количества циклов

$$I_1 = \frac{i}{n}, \quad (2.15)$$

где  $i$  – максимальный ток в сварочном контуре, А;  
 $n$  – число варисторов на блоке.

$$I_1 = \frac{200}{1200} = 0,17 \text{ А}$$

Согласно графику, при силе тока на одном варисторе 0,17 А он способен выдержать бесконечное количество импульсов.

### 3 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1 Компоновка и создание трехмерной модели инвертора сварочного тока

Компоновка - процесс поиска оптимального планировочного решения объекта с учётом функциональных связей его отдельных частей. Компоновка составных частей инвертора сварочного тока должна учитывать специфику его обслуживания и ремонта. Для этого необходимо рационально расположить все электронные и электротехнические составляющие.

Проектируемый инвертор состоит из:

- блока управления;
- блока варисторов;
- блока питания;
- транзисторного коммутатора тока;
- сглаживающих дросселей;
- трансформатора;
- стабилизатора горения дуги;
- радиатора системы охлаждения;
- вентиляторов принудительного воздушного охлаждения.

Одним из основных условий при разработке компоновки элементов инвертора является максимально возможное уменьшение его габаритных размеров и массы.

С учетом этого было предложено провести оптимизацию с использованием 3D - моделирования.

Для достижения оптимальных габаритов инвертора необходима компоновка всех элементов силовой и электронной части. В связи с чем, необходимо сконструировать корпус из листового металла исходя из следующих условий:

- минимальные габаритные размеры;

- жесткость конструкции;
- малая трудоемкость сборки;
- доступность ремонта;
- обеспечение эффективного охлаждения варисторного блока и полупроводниковых ключей.

Для упрощения конструирования корпуса и компоновки элементов, было применено трехмерное моделирование в системе автоматического проектирования с помощью программного продукта «Компас 3D»

В результате была получена трехмерная модель конструкции инвертора сварочного тока (см. приложение Б), с помощью которой достигнуто:

- оптимальное расположение элементов, входящих в состав экспериментального источника питания;
- обеспечен простой доступ к элементам крепления и коммутации (тем самым облегчена сборка данного макета, доступность ремонта и простота подключения измерительных датчиков для проведения экспериментальных исследований);
- предусмотрена система принудительного воздушного охлаждения полупроводниковых ключей и варисторных блоков.

Был проведен сравнительный анализ исходного ИСТ-201 и спроектированного. В исходной конструкции ИСТ-201 в качестве полупроводниковых ключей используются IGBT-модули CM300DY-12NF (Mitsubishi, Япония), которые установлены на общий алюминиевый радиатор охлаждения типа O55 (Электровыпрямитель, Россия) длиной 300 мм. Общий вес IGBT-модулей равен 1,2 кг, а масса радиатора – 6 кг. Суммарная цена IGBT-модулей (4 шт.) составила 28 000 руб., радиатора – 2250 руб. Таким образом можно сделать вывод, что снижение массы и размеров ИСТ-201 можно добиться за счет замены IGBT-модулей на дискретные транзисторы и радиаторов их охлаждения. В новой конструкции было предложено использовать IGBT транзисторы IRGP6690D (International Rectifier, США), которые установлены на радиаторы профиля РА – 250 (ЛИГРА, Россия)

длиной 125 мм. Общий вес дискретных транзисторов IRGP6690D составил 0,25 кг, а масса радиаторов – 2,6 кг. Суммарная цена транзисторов (40 шт.) составила 12 000 руб., радиаторов (8 шт.) – 900 руб. Таким образом, удалось снизить общую массу инвертора на 4,3 кг, а себестоимость на 17 000 руб. На рисунке 3.1 представлена сборка силовой части инвертора слева исходного ИСТ-201, справа спроектированного.

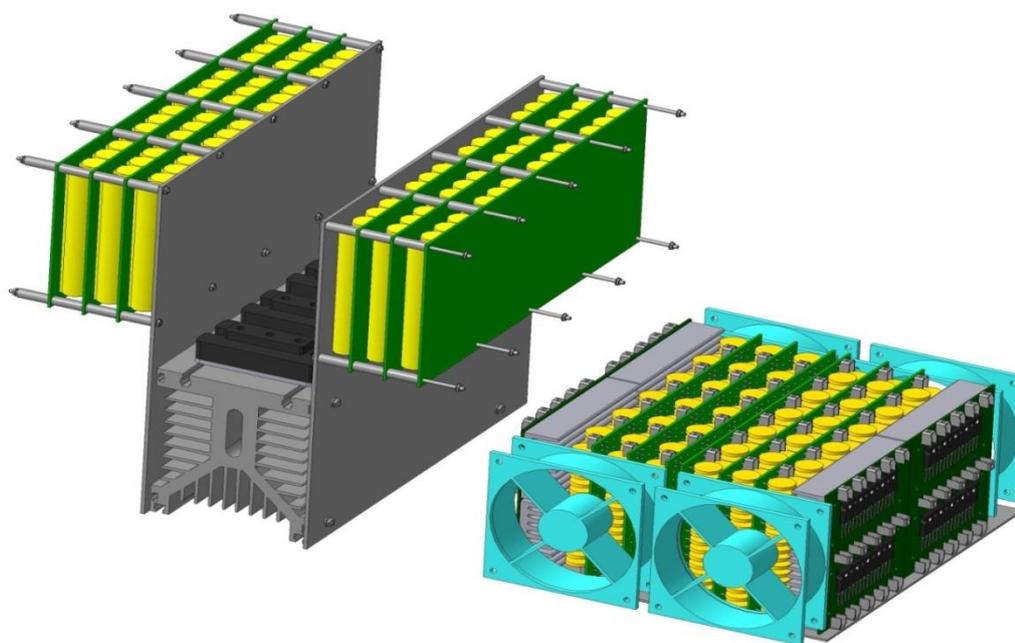


Рисунок 3.1 – Сборка силовой части

С учетом новой силовой части был сконструирован корпус инвертора, габаритные размеры которого составили (Д×Ш×В): 440×290×410 мм, исходного (Д×Ш×В): 490×370×410 мм(рис.3.2).



Рисунок 3.2 – Сравнение габаритных размеров корпусов

## 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

### 4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В целевой рынок входят коммерческие и подрядные организации отраслей электроэнергетики, теплоэнергетики, организации по добыче и транспортировке нефти и газа, а также предприятия коммунального хозяйства.

Для данных коммерческих организаций критерием сегментирования является ремонт и строительство. Производим сегментирование рынка для реализации технологии сварки деталей в условиях возмущающего действия магнитного поля и оборудования для данного процесса по критериям ремонт и строительство. Данная технология в ремонте и строительстве трубопроводов является новым направлением, которым до сегодняшнего дня никто не занимался.

Основными сегментами данного рынка являются энергетическая промышленность (нефтегазовая отрасль) и коммунальное хозяйство, на них и будет направлена ориентация предприятия.

#### 4.1.1 FAST – анализ

FAST-анализ выступает как синоним функционально-стоимостного анализа. Суть этого метода базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого объекта, выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат, которые возникают из-за введения ненужных функций, не имеющих прямого отношения к назначению объекта, или связаны с несовершенством конструкции, технологических процессов, применяемых материалов, методов организации труда и т.д.

FAST – анализ состоит из шести стадий:

1. Выбор объекта FAST-анализа;
2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом;
3. Определение значимости выполняемых функций объектом;
4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования;
5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ;
6. Оптимизация функций, выполняемых объектом.

#### Стадия 1. Выбор объекта FAST-анализа.

Объектом данного анализа является объект исследования, а именно разработка оборудования для дуговой сварки намагниченных деталей.

Стадия 2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом.

Главной функцией (назначением) данной технологии является возможность получения качественных сварных соединений в условиях возмущающего действия поперечного магнитного поля.

В качестве основных функций оборудования для дуговой сварки намагниченных деталей можно выделить схему инвертора для дуговой сварки в условиях намагниченности, что гарантирует хорошее формирование и качество сварного шва.

К вспомогательным функциям можно отнести возможность получения сварного соединения без каких-либо особых усилий, т.к. процесс сварки намагниченных деталей данным видом оборудования ничем не отличается от обычного процесса сварки покрытым электродом.

#### Стадия 3. Определение значимости выполняемых функций объектом.

Для оценки значимости функций будем использовать метод расстановки приоритетов, предложенный Блумбергом В.А. и Глущенко В.Ф. В основу данного метода положено расчетно-экспертное определение значимости каждой функции.

Для начала необходимо построить матрицу смежности функций, в которой определим более значимые из них.

Таблица 1 - Матрица смежности функций технологии автоматической сварки в щелевую разделку методом один валик в слое

	Возможность получения качественных сварных соединений	Сварка в условиях возмущающего действия магнитного поля	Отсутствие громоздкого оборудования	Возможность получения сварного соединения без особых усилий
Возможность получения качественных сварных соединений	=	=	>	>
Сварка в условиях возмущающего действия магнитного поля	=	=	>	>
Отсутствие громоздкого оборудования	<	<	=	>
Возможность получения сварного соединения без особых усилий	<	<	<	=

*Примечание:* «<» – менее значимая; «=» – одинаковые функции по значимости; «>» – более значимая

После определения более значимых функций нужно определить количественное соотношение функции. Для этого построим матрицу количественных соотношений функций.

Таблица 2 - Матрица количественных соотношений функций

	Возможность получения качественных сварных соединений	Сварка в условиях возмущающего действия магнитного поля	Отсутствие громоздкого оборудования	Возможность получения сварного соединения без особых усилий	ИТОГО
Возможность получения качественных сварных соединений	1	1	1,5	1,5	5
Сварка в условиях возмущающего действия магнитного поля	1	1	1,5	1,5	5
Отсутствие громоздкого оборудования	0,5	0,5	1	1,5	3,5
Возможность получения сварного соединения без особых усилий	0,5	0,5	0,5	1	2,5
<i>Примечание:</i> 0,5 при «<»; 1,5 при «>»; 1 при «=»					$\Sigma=16$

Согласно матрице количественных соотношений получили следующие относительные значения значимости функций: возможность получения качественных сварных соединений – 0,3125 (5/16), сварка в условиях возмущающего действия магнитного поля – 0,3125 (5/16), отсутствие громоздкого оборудования – 0,21875 (3,5/16), возможность получения сварного соединения без особых усилий – 0,15625 (2,5/16). Видно, что самой значимой функцией (назначением) оборудования для дуговой сварки намагниченных деталей является её главное назначение – возможность получения качественного сварного соединения.

Стадии 4 и 5 - анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования и построение функционально-стоимостной диаграммы объекта, и ее анализ соответственно производить не будем, так как представленные

функции данной технологии сварки носят общий характер и не могут быть на данный момент оценены в денежном эквиваленте.

Стадия 6. Оптимизация функций, выполняемых объектом.

Оборудование для дуговой сварки намагниченных деталей позволяет сократить общее время и затраты на ремонт и строительство в условиях возмущающего воздействия магнитного поля за счет разработки специальной схемы силовой части транзисторного преобразователя. В данном способе применяются электроды с основным типом покрытия, что способствует экономии сварочного материала.

По сравнению с использующимися на сегодняшний день методами, сварка инвертором ИСТ-201 позволяет получать качественные сварные соединения, ничем не уступающие по качеству соединениям, выполненным при отсутствии поперечного магнитного поля.

#### 4.1.2 SWOT– анализ

SWOT-анализ – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) - это определение сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз по его осуществлению. Этот анализ проводят для выявления внешней и внутренней среды проекта. Проводится данный анализ в несколько этапов.

Первый этап.

Данный этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

К сильным сторонам проекта относятся:

Стабильное течение процесса формирования валика в разделке – С1. Качественное формирование сварного шва – С2. Возможность сварки плоских намагниченных деталей и труб – С3. Возможность сварки во всех

пространственных положениях без изменения режимов сварки – С4.  
Продолжительность нагрузки постоянна и равна 100% – С5.

К слабым сторонам проекта относятся:

Сложность электроники инвертора – Сл.1. Использование переменного прямоугольного тока – Сл.2.

К возможностям проекта относятся:

Внедрение на рынок нового способа сварки в магнитном поле за счет достоинств и вытеснение устаревших разработок – В1. Финансовая поддержка спонсора – В2.

К угрозам относятся:

Ненадежность электроники за счет использования сложной схемы мостового транзисторного преобразователя – У1.

Второй этап.

Данный этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Таблица 3 – Интерактивная матрица проекта

<b>Сильные стороны проекта</b>					
<b>Возможности</b>	<b>С1</b>	<b>С2</b>	<b>С3</b>	<b>С4</b>	<b>С5</b>
<b>В1</b>	+	+	-	+	-
<b>В2</b>	-	-	-	-	-

Третий этап.

В рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа.

Таблица 4 – Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>
	<p>Стабильное течение процесса формирования валика в разделке – С1. Качественное формирование сварного шва – С2. Возможность стыковой сварки плоских намагниченных деталей и труб – С3. Возможность сварки во всех пространственных положениях без изменения режимов сварки – С4. Продолжительность нагрузки постоянна и равна 100% – С5.</p>	<p>Сложность электроники инвертора – Сл.1. Использование переменного прямоугольного тока – Сл.2.</p>
<b>Возможности</b>		
<p>Внедрение на рынок нового способа сварки в магнитном поле за счет достоинств и вытеснение устаревших разработок – В1. Финансовая поддержка спонсора – В2.</p>	<p>Показ достоинств технологии дуговой сварки в магнитном поле на выставках, посвященных сварочным технологиям. Реклама в СМИ.</p>	<p>За счет преимуществ в данной технологии по сравнению с технологиями, используемыми на сегодняшний день, велика вероятность того, что разработка получит еще больший спрос на рынке.</p>
<b>Угрозы:</b>		
<p>Ненадежность электроники за счет использования сложной схемы мостового транзисторного преобразователя – У1.</p>	<p>Поиск способов упрощения электрической схемы инвертора за счет новых исследований в этой области.</p>	<p>Организации, занимающиеся строительством и ремонтом, заинтересованные в данной технологии, будут спонсировать данные исследования.</p>

#### 4.1.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На данном этапе производится оценка степени готовности проекта к коммерциализации и определение уровня собственных знаний для ее проведения или завершения. Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

При проведении анализа по таблице, приведенной ниже, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 балл означает не знаком или мало знаю, 2 балла – в объеме теоретических знаний, 3 балла – знаю теорию и практические примеры применения, 4 балла – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 баллов – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Таблица 5 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование</b>	<b>Степень проработанности научного проекта</b>	<b>Уровень имеющихся знаний у разработчика</b>
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	5	4
3.	Определены отрасли и технологии	5	3

	(товары, услуги) для предложения на рынке		
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	5	4
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	5	5
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	5	4
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	3	3
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	5
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	3
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	4
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	4
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	63	56

Таким образом, можно сказать, что разработка является перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации.

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Таблица 9-Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Создание темы проекта	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель
	2	Анализ актуальности темы	
Выбор направления исследования	3	Поиск и изучение материала по теме	Студент
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель, студент
	5	Календарное планирование работ	
Теоретические исследования	6	Изучение литературы по теме	Студент
	7	Подбор нормативных документов	
	8	Разработка принципиальной схемы инвертора	
Практические исследования	9	Разработка экспериментальной установки	Студент
	10	Моделирование силовой части и корпуса инвертора	
Оценка полученных результатов	11	Анализ результатов	Научный руководитель, студент
	12	Заключение	Научный руководитель, студент

### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (2)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (3)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

#### 4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ки} = T_{pi} \times k_{\text{кал}}, \quad (4)$$

где  $T_{ки}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{кал}} = 365$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}} = 104$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 14$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48.$$

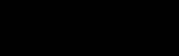
Все рассчитанные значения вносим в таблицу (табл. 10).

После заполнения таблицы 10 строим календарный план-график (табл. 11). График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделим различной штриховкой в зависимости от исполнителей.

Таблица 10 - Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Исполнители	Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$			Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$		
	$t_{\min}$ , чел-дни			$t_{\max}$ , чел-дни			$t_{\text{ож}}i$ , чел-дни									
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Составление и утверждение темы проекта	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руководитель	2	2	2	3	3	3
Анализ актуальности темы	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Рук.-студ.	1	1	1	2	2	2
Поиск и изучение материала по теме	1	1	1	5	5	5	2,6	2,6	2,6	Студ.-рук.	1	1	1	2	2	2
Выбор направления исследований	1	2	2	3	4	4	1,4	2,8	2,8	Руководитель	1	2	2	2	3	3
Календарное планирование работ	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руководитель	2	2	2	3	3	3
Изучение литературы по теме	7	7	7	14	14	14	9,8	9,8	9,8	Студент	10	10	10	15	15	15
Подбор нормативных документов	5	6	6	8	9	9	6,2	7,2	7,2	Студ.-рук.	3	4	4	5	6	6
Разработка принципиальной схемы инвертора	3	5	5	5	7	7	3,8	5,8	5,8	Студент	4	6	6	6	9	9
Разработка экспериментальной установки	1	2	3	3	4	5	1,8	2,8	3,8	Студент	2	3	4	3	5	6
Моделирование силовой части и корпуса инвертора	1	2	2	2	3	3	1,4	3	3	Студент	2	3	3	3	5	5
Анализ результатов	1	1	1	4	4	4	2,2	2,2	2,2	Студ.-рук.	2	2	2	3	3	3
Заключение	1	1	1	4	4	4	2,2	2,2	2,2	Студент	3	3	3	4	4	4

Таблица 11- Календарный план-график проведения научно-технического исследования

№ Работ	Вид работ	Исполнитель	Т <sub>к</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ										
				Март			апрель			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение темы проекта	Руководитель	3											
2	Анализ актуальности темы	Рук.-студ.	2	 										
3	Поиск и изучение материала по теме	Студ.-рук.	2		 									
4	Выбор направления исследований	Руководитель	2											
5	Календарное планирование работ	Руководитель	3											
6	Изучение литературы по теме	Студент	15											
7	Подбор нормативных документов	Студ.-рук.	5				 							
8	Разработка принципиальной схемы инвертора	Студент	6											
9	Разработка экспериментальной установки	Студент	3											
10	Моделирование силовой части и корпуса инвертора	Студент	3											
11	Анализ результатов	Студ.-рук.	3									 		
12	Заключение	Студент	4											

 – студент;  – руководитель.

### 4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

#### 4.3.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество необходимых материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Затраты на материал:

- Лист стали толщиной 2 мм, 1200x450 мм стоимость 800 руб.

Стоимость с учетом транспортных расходов: 1050 руб.

- Изготовление корпуса сварочного аппарата - 1500 руб. Стоимость с учетом транспортных расходов - 1500 руб.

- Диоды - 500 руб. Тиристоры - 700 руб. Соединительные провода - 300 руб. Управляющие дроссели - 2000 руб. Сварочные кабели - 3000 руб. Электрододержатель - 800 руб. Плата управления - 1500 руб. Медные шины - 350 руб. Промышленные метизы - 320 руб. Выводные клеммы - 450 руб. С учетом транспортных расходов - 11000 руб.

- Изготовление тиристорных плат – 3000 руб. С учетом транспортных расходов – 3200 руб.

Итого: 16750 руб.

#### 4.3.2 Специальное оборудование для научных работ

К статье «Специальное оборудование» можно отнести:

Ноутбук – стоимость с учетом транспортных расходов 13500 руб.

Осциллограф – стоимость с учетом транспортных расходов 9450 руб.

Мультиметр – стоимость с учетом транспортных расходов 1150 руб.

Итого по статье: 24100 руб.

#### 4.3.3 Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда.

Месячный должностной оклад руководителя:

$$Z_m = Z_b \cdot k_p, \quad (4.1)$$

$$Z_m = 23264,86 \cdot 1,3 = 30243,2 \text{ руб / мес}$$

где  $Z_b=23264,86$  – базовый оклад руководителя (доцент, к.т.н.), руб/мес.;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска)

Среднедневная заработная плата руководителя (доцент, к.т.н.) рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (4.2)$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{30243,2 \cdot 10,4}{259} = 1214,4 \text{ руб / день}$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб.дня  $M=11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб.дней  $M=10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочих дней.

Таблица 11 - Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	58	58
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	259	259

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (доцент, к.т.н.) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (4.3)$$

$$Z_{\text{осн}} = 1214,4 \cdot 275 = 333960 \text{ руб}$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника, руб;

$T_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн;

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Месячный должностной оклад исполнителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (4.4)$$

$$Z_{\text{м}} = 8022,65 \cdot 1,3 = 10429,5 \text{ руб / мес}$$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (4.5)$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{10429,5 \cdot 10,4}{259} = 418,8 \text{ руб / день}$$

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) исполнителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (4.6)$$

$$Z_{\text{осн}} = 418,8 \cdot 332 = 139041,6 \text{ руб}$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Таблица 12 – Расчёт основной заработной платы руководителя

<b>Исполнители</b>	<b><math>Z_b</math>, руб/мес</b>	<b><math>k_p</math></b>	<b><math>Z_m</math>, руб/мес</b>	<b><math>Z_{\text{дн}}</math>, руб/день</b>	<b><math>T_p</math>, дни</b>	<b><math>Z_{\text{осн}}</math>, руб.</b>
Руководитель	23264,86	1,3	30243,2	1214,4	259	333960
Исполнитель	8022,65	1,3	10429,5	418,8	332	139041,6

#### 4.3.4 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп.рук.}} = k_{\text{доп.}} \cdot Z_{\text{осн.рук.}} \quad (4.7)$$

$$Z_{\text{доп.рук.}} = 0,12 \cdot 333960 = 40075,2 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{доп.исп.}} = k_{\text{доп.}} \cdot Z_{\text{осн.исп.}} \quad (4.8)$$

$$Z_{\text{доп.исп.}} = 0,12 \cdot 139041,6 = 16685 \text{ руб}$$

где  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

$Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

В табл. 13 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 13 – Заработная плата исполнителей НИИ

<b>Заработная плата</b>	<b>Руководителя</b>	<b>Исполнителя</b>
Основная зарплата, руб	333960	139041,6
Дополнительная зарплата, руб	40075,2	16685
Итого по статье $C_{зп}$ , руб	374035,2	155726,6

#### 4.3.5 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (4.9)$$

$$C_{внеб.рук.} = 0,3 \cdot (333960 + 40075,2) = 112210,6 \text{ руб.}$$

$$C_{внеб.исп.} = 0,3 \cdot (139041,6 + 16685) = 46718 \text{ руб.}$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

#### 4.3.6 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{накл} = k_{накл} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) \quad (4.10)$$

$$C_{\text{накл}} = 0,8 \cdot 529761,8 = 423809,4 \text{ руб}$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице 14.

Таблица 14 – Группировка затрат по статьям

Статьи	Вид работ
Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты, руб	16750
Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, руб	24100
Основная заработная плата, руб	473001,6
Дополнительная заработная плата, руб	56760,2
Отчисления на социальные нужды, руб	158928,6
Накладные расходы, руб	423809,4
Итого плановая себестоимость, руб	1153350

#### 4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты, и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

В данной магистерской диссертации выбрана тема, посвященная разработке оборудования для дуговой сварки покрытым электродом в условиях возмущающего действия поперечного магнитного поля. С точки зрения ресурсоэффективности можно сказать, что при применении данного типа оборудования мы получаем экономию сварочных материалов около 35%, в связи с отсутствием разбрызгивания расплавленного электродного металла, по отношению к имеющимся на сегодняшний день методам. Также благодаря высокой продолжительности нагрузки по сравнению с небольшими габаритными размерами инвертора и малым напряжением холостого хода, получаем, что сварку можно вести без перерывов и пауз. В большей мере это осуществимо благодаря разработанной схеме мостового транзисторного преобразователя, которая реализована в данном сварочном инверторе.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что данный тип оборудования для сварки намагниченных деталей имеет намного больше ресурсных, финансовых и экономических достоинств по сравнению с аналогами и тем самым является востребованным на рынке.

## 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Исследуемый в данной работе инвертор сварочного тока для дуговой сварки переменным прямоугольным током высокой частоты намагниченных деталей относится к области электродуговой сварки, поэтому в диссертации приводится анализ вредных и опасных производственных факторов, характерных именно для этой сферы производственной деятельности.

В процессе сварки, сварщик в условиях возмущающего воздействия магнитного поля подвержен воздействиям комплекса опасных и вредных производственных факторов различной природы: излучение, сварочные аэрозоли, искры и брызги расплавленного металла и шлака, электромагнитные поля, газы, сильный акустический эффект. Все вышеперечисленные факторы вызывают болезни либо отклонения в здоровье человека.

### 5.1 Производственная безопасность при сварке намагниченных деталей

Электрическая сварка металлов сопровождается наличием вредных и опасных производственных факторов, к числу которых относятся:

- высокая температура поверхностей материалов и оборудования;
- большая температура воздуха в зоне работы;
- чрезмерная величина напряжения электрической цепи, причем её замыкание может пройти через человека;
- высокая яркость света;
- высокий уровень ультрафиолетового излучения;
- много пыли и загазованности воздуха рабочей зоны;
- брызги, искры и выброс расплавленного металла;
- высокий уровень ионизирующего излучения в зоне работы сварщика;
- высокий уровень шума при использовании прямоугольного переменного тока высокой частоты.

### 5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов

Электродуговая сварка должна выполняться в соответствии с требованиями по ГОСТ 12.3.003-86 «Система стандартов безопасности труда. Работы электросварочные». Требования безопасности по ГОСТ 12.1.004-91 ФЗ-123 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность». Общие требования по ГОСТ 12.1.010-76 «Система стандартов безопасности труда. Взрывобезопасность». Общие требования по ГОСТ 12.3.002-75 «Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные». А также в соответствии с санитарными правилами при сварке, резке и наплавке металлов, которые утверждены министерством здравоохранения.

Электрическая сварочная дуга — сильный источник лучистой энергии. Электрическая дуга излучает невидимые инфракрасные, видимые световые и невидимые ультрафиолетовые лучи. Являясь составными частями одного лучевого потока, эти лучи вызывают различные заболевания.

Невидимые инфракрасные лучи, особенно при длине волны от 0,00076 до 0,0015 мм и длительном облучении, вызывают общую потерю зрения. Это заболевание носит название катаракта хрусталика. При правильном подборе защитных стекол инфракрасные лучи полностью поглощаются.

Видимые световые лучи, имея длину волны от 0,00076 до 0,0004 мм, при кратковременном облучении действуют ослепляюще, а при длительном вызывают ослабление зрения. Это объясняется тем, что яркость видимых лучей электрической дуги больше примерно в 10 000 раз яркости лучей, которые могут быть переносимы без напряжения незащищенным глазом.

Ультрафиолетовые лучи, имея длину волны от 0,0004 до 0,00022 мм, даже при сравнительно кратковременном облучении (в течение нескольких минут) вызывают заболевание глаз. Это заболевание носит название светобоязнь и сопровождается острой болью и слезотечением. Светобоязнь при нормальном исходе проходит через 2—3 дня, не вызывая никаких последствий. Облучение ультрафиолетовыми лучами в течение 1—3 час. вызывает ожог

кожи. Ожог кожи наблюдается, главным образом, у сборщиков и у работающих вблизи мест сварки. У сварщиков тело защищается во время работы одеждой, лицо и шея щитком, а руки рукавицами.

Для предупреждения ожогов кожи и заболевания глаз под действием лучей электрической дуги необходимо предусматривать, помимо индивидуальных средств защиты, общие средства. Эти общие средства должны надежно предохранять от лучей лиц, окружающих сварщика. К ним относятся: 1) кабины с дверями, закрытыми брезентовыми занавесками, в случае, когда сварочные работы ведутся на одном месте; 2) переносные щиты и ширмы, если сварочные работы носят временный характер.

### 5.1.2 Защита органов дыхания от сварочных аэрозолей

Наиболее опасным фактором при проведении сварочных работ является выделение сварочного аэрозоля в рабочей зоне. Так, по статистике, более половины профессиональных заболеваний сварщиков - это заболевания органов дыхания и различные патологии, связанные с вдыханием сварочного аэрозоля. Сварочный аэрозоль представляет собой совокупность мельчайших частиц, образовавшихся в результате конденсации паров расплавленного металла, обмазки электродов, содержимого порошковой проволоки или флюсов. Его состав зависит от состава сварочных и свариваемых материалов. В основном сварочный аэрозоль состоит из железа и его окислов, но в него могут также входить такие вещества и их соединения, как марганец, хром, никель, алюминий, медь, цинк, фтор, кремний, азот и другие. Из-за собственных маленьких размеров (которые могут составлять менее 1 мкм) сварочный аэрозоль беспрепятственно проникает вглубь отделов легких и частично остается в их стенках, а далее всасывается в кровь. Если сварочный аэрозоль содержит значительное количество марганца, то, распространяясь по

крови в организме, этот элемент может вызывать тяжелейшее заболевание, то есть марганцевую интоксикацию. При этом обычно страдает центральная нервная система, и изменения в организме носят необратимый характер. В настоящее время установлено, что компоненты сварочного аэрозоля могут увеличивать риск возникновения онкологических и сердечнососудистых заболеваний, а также могут уменьшить длительность жизни человека.

В соответствии с ГОСТ 12.3.003—75 средства индивидуальной защиты органов дыхания следует применять при отсутствии местных отсосов. В некоторых случаях местные вытяжные устройства не могут обеспечить требуемых параметров воздушной среды, поэтому также необходимо применение средств индивидуальной защиты органов дыхания.

Когда концентрации газов в зоне дыхания невелики, можно применять противопылевые респираторы. Практика показывает, что ткань респираторов можно применять для защиты от микробных, ядовитых и нетоксических пылей. Ткань отличается хорошими пылезадерживающими свойствами, обладает малой массой и небольшим сопротивлением дыханию.

Когда сварщик работает в условиях высоких концентраций не только аэрозоля, но и газов, следует пользоваться шланговыми противогазами с принудительной подачей воздуха. Недостатком применяемых для индивидуальной защиты органов дыхания шланговых противогазов является отсутствие устройств для подогрева воздуха, что ограничивает возможность пользования ими в холодный период года, а также фильтров для очистки воздуха, загрязненного парами и туманами масла.

### 5.1.3 Защита от поражения электрическим током

Несмотря на сравнительно низкое напряжение источников сварочного тока при электродуговой сварке, возможно поражение работающих электрическим током. При этом поражение может быть даже смертельным.

В связи с этим при электродуговой сварке необходимо строго выполнять правила техники безопасности в отношении защиты от поражения электрическим током. Основные пункты этих правил следующие:

- сварочные провода на всей длине должны иметь надежную изоляцию. Их присоединение к контактными болтам клеммных досок источников сварочного тока необходимо производить с помощью наконечников;

- электрододержатель должен быть снабжен изолированной рукояткой. Место крепления сварочного провода к держателю также должно быть надежно изолировано. Особенно тщательно следует изолировать части электрододержателя при работе в труднодоступных, а также в сырых местах и при повышенной температуре окружающего воздуха;

- корпус мотора сварочной машины и кожух сварочного трансформатора должны быть подключены к общей сети заземления медным проводом сечением не менее  $6 \text{ мм}^2$  или стальной шиной сечением не менее  $12 \text{ мм}^2$ . Кроме того, у сварочного трансформатора кожух должен быть соединен с магнитопроводом медной шиной сечением не менее  $6 \text{ мм}^2$ . Медная шина к магнитопроводу крепится пайкой мягким припоем. К кожуху трансформатора шина крепится болтом для заземления;

- электросварщик не должен самостоятельно производить присоединение сварочной установки к силовой сети, постановку плавких

вставок на щите силовой сети, отключать сварочную установку от сети, а также производить ремонт подключенной к сети установки. Все эти работы должны выполняться электромонтерами с соблюдением общих электротехнических правил для силовых установок;

- спецодежда электросварщика должна быть сухой и исправной. Куртка, брюки, фартук и рукавицы должны быть из брезента или сукна. Ботинки или кожаные сапоги должны иметь кожаную подошву, прикрепленную деревянными гвоздями. Резиновые подошвы ботинок и сапог должны быть приклеены путем горячей вулканизации или клеем;

- во время работы электросварщик должен находиться на резиновом коврикe, сухих деревянных досках, сухом асбесте или другой изоляционной подкладке;

- при работе в сухих помещениях лампы местного электрического освещения должны питаться током с напряжением не выше 36 В, а в сырых помещениях и закрытых сосудах не выше 12 В;

- при работах в сосудах, штольнях, коробках и других труднодоступных местах электросварщик должен иметь подручного. Подручный в случае поражения электросварщика током выключает сварочную установку и оказывает пострадавшему первую помощь;

- при сильном поражении электрическим током, когда пострадавший не подает признаков жизни, необходимо до прихода врача делать искусственное дыхание до тех пор, пока пострадавший не очнется. Для этого пострадавшего укладывают на спину, под лопатки подкладывают мягкий сверток так, чтобы голова была немного ниже туловища. Ворота, пояс должны быть расстегнуты, рот раскрыт, язык вытянут. При этом челюсти необходимо разжать куском дерева, деревянной рукояткой инструмента, куском текстолита. После этого оказывающий помощь становится со стороны головы пострадавшего

берет руки около локтей, отводит их назад и в этом положении удерживает 2—3 секунды (вдох). Затем руки ведут к груди, прижимают к ней, выдерживают в этом положении 2—3 секунды (выдох), снова отводят назад, повторяя ритмично указанные движения.

Выполнение указанных выше пунктов правил техники безопасности позволяет предохранить работающих от поражения электрическим током. При сварочных работах необходимо всегда помнить, что напряжение в сварочной цепи (особенно при холостом ходе) опасно для жизни человека. Эта опасность возрастает в случае, когда кожа человека влажная или повреждена.

#### 5.1.4 Шумы и вибрации

Нормируемые параметры шума на рабочих местах определены ГОСТ 12.1.003-83 и санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки».

Нормируемыми параметрами шума являются уровни в децибелах среднеквадратичных звуковых давлений, измеряемых по линейной характеристике шумомера в активных полосах частот со среднегеометрическими частотами 63, 125, 250, 500, 2000, 4000, 8000Гц.

Борьба с вибрациями должна происходить в самом источнике возникновения. Это происходит при конструировании, а также изготовлении оборудования. Снижение уровня вибраций может быть достигнуто виброгашением, которое чаще реализуется путем установки вибрирующих агрегатов на самостоятельные виброгасящие основания (фундамент). Также используют динамическое гашение колебаний, вибродемпфирование и изменение конструктивных элементов машин и строительных конструкций.

Уменьшение влияния данного фактора возможно путем:

- Изоляции источников шумов;
- Проведения акустической обработки помещения;
- Создания дополнительных ДВП или ДСП изоляционных перегородок;
- Защита от шумов - заключение вентиляторов в защитный кожух и внутрь корпуса ЭВМ.

### 5.1.5 Недостаточное освещение

Сварщикам приходится выполнять операции, различающиеся по точности зрительной работы: разметку, сборку, чтение чертежей, сварку, контроль сварных соединений и др. Наличие источников повышенной яркости вызывает необходимость частой переадаптации зрения: каждый раз при переходе от вспомогательных операций, выполняемых без щитка, к сварке, выполняемой обязательно со щитком.

Создание высоких уровней освещенности мест сварки (порядка десятков тысяч люкс) с тем, чтобы все операции можно было выполнять со щитком, экономически не выгодно и практически сложно. Уровни освещенности для сварочных работ установлены в соответствии с действующими нормативными документами для люминесцентных ламп 150 лк, а для ламп накаливания 50 лк с учетом наличия в поле зрения самосветящихся элементов.

Характер технологических операций в сборочно-сварочных цехах (работа на нефиксированных местах) определяет целесообразность создания системы общего освещения, локализованного или равномерного общего использованием переносных светильников местного освещения. С учетом возможности использования газоразрядных источников света целесообразно повысить уровни освещенности при электросварочных работах до 500 лк при общем и местном освещении и до 300 лк при одном общем освещении.

В переносных светильниках необходимо предусматривать ограничение прямой блескости. Под кранами должны быть повешены дополнительные

светильники, компенсирующие затемнение рабочих мест. При сварке внутри емкостей следует использовать светильники направленного действия, расположенные снаружи, или ручные переносные светильники, имеющие защитную сетку (трансформатор должен быть установлен снаружи, его вторичная обмотка заземлена; не допускается применение автотрансформаторов).

Светильники, окна и световые фонари необходимо очищать по мере загрязнения (не реже одного раза в три месяца).

Окраску стен целесообразно выполнять специальными красками, обладающими высоким коэффициентом отражения для видимой части спектра и низким коэффициентом — для ультрафиолетовых лучей.

Правильно спроектированное освещение в производственных помещениях обеспечивает хорошую освещенность рабочей поверхности, а также рациональное направление света, при этом отсутствуют резкие тени и блики на поверхностях. Неправильное устройство освещения в производственном помещении может затруднить работу, вследствие чего повышается утомляемость, снижается производительность труда, а также это может стать причинами травматизма и глазных заболеваний. Если светильники и проводки подобраны неправильно, то это может стать причиной пожара.

#### 5.1.6 Микроклимат

На производственный микроклимат установлены нормы системой стандартов безопасности труда по ГОСТу 12.1.005 – 88 «Общие санитарные и гигиенические требования к воздуху в рабочей зоне».

Микроклимат помещений для лёгкой категории работ включает определённую температуру и влажность. Нормы метеорологических условий учитывают время года и характер производственного помещения. Нормы метеоусловий для категорий работ по тяжести Ia согласно СНиП 2.2.4. 548-96 см. в таблице 1.

Таблица 1- Нормы метеорологических условий

Холодный период года $t_{нар}^{возд}$ ниже +10, °C						Тёплый период года $t_{нар}^{возд}$ +10, °C					
Оптимальные			Допустимые			Оптимальные			Допустимые		
Температура воздуха, °C	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	Температура воздуха, °C	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	Температура воздуха, °C	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	Температура воздуха, °C	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
22-24	40-60	Не более 0,1	20-25	15-75	Не более 0,1	23-25	40-60	Не более 0,1	21-28	15-75	0,1-0,2

В настоящих нормах нормируется отдельно каждый компонент микроклимата в рабочей зоне производственного помещения: относительная влажность, температура, скорость воздуха в зависимости от способности человека к акклиматизации в разное время года, характера одежды, интенсивности производственной работы и характера тепловыделений в рабочем помещении.

Для защиты и удаления вредных газов и пыли с мест сварки и подачи чистого воздуха используют вентиляцию. Общая вентиляция бывает приточно-вытяжной. Свежий воздух обычно подают в цех через общецеховую вентиляционную установку, а загрязненный воздух удаляют из цеха общецеховой вентиляцией, а также местными устройствами.

Местная вытяжная вентиляция, удаляя вредные вещества из помещения, должна препятствовать их попаданию в зону дыхания рабочего. Местный отсос можно считать удовлетворительно работающим, когда он удаляет вредности по принципу «от рабочего».

Нередко источник выделения вредных веществ укрывают зонтом, под которым находится рабочий, что совершенно недопустимо, так как через зону дыхания в этом случае проходят все вредные вещества. Поэтому, на рабочих

местах в зоне сварки нужно установить аппаратуру с отсасывающим поворотным рукавом.

Сварочные участки, сообщающиеся проемами со смежными помещениями, где не проводится сварка, должны иметь вытяжную вентиляцию с механическим побуждением.

Вредными основными веществами, выделяющимися при сварке сталей, являются: окись углерода, хром, марганец и фтористые соединения.

В таблице 2 представлены классы опасностей вредных веществ выделяющихся при сварке сталей.

Таблица 2 – Классы опасностей вредных веществ выделяющихся при сварке сталей

Вещество	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	Состояние
Марганец	0,05	1	аэрозоли
Хром	0,1	1	аэрозоли
Фтористые соединения	0,5	2	аэрозоли
Окись углерода	20	4	пары или газы

В сварочных цехах на стационарных рабочих постах, а также, где это возможно, на нестационарных постах следует устанавливать местные отсосы.

В специальных помещениях или металлических шкафах для хранения баллонов со сжиженным газом должна быть предусмотрена естественная вентиляция через верхние и нижние части помещений или шкафов.

Скорость движения воздуха, создаваемая местными отсосами у источников выделения вредных веществ, должна соответствовать нормам, приведенным в таблице.

Таблица 3 – Скорость движения воздуха, создаваемая отсосами у источников выделения вредных веществ

Процесс сварки	V, м/с
Сварка ручная	$\geq 0,5$

Количество вредных веществ, локализуемых местными отсосами, составляет для вытяжных шкафов не более 90%, а для местных отсосов других видов не более 75%. Оставшееся количество вредных веществ (10-20%) должно разбавляться до ПДК с помощью общеобменной вентиляции.

## 5.2 Экологическая безопасность.

Под экологической безопасностью понимают комплекс организационно-технических мер, направленных на обеспечение соответствия природоохранной деятельности предприятия нормативным требованиям. В свете повышения уровня экологической ответственности безопасность предприятия для окружающей среды и населения в известной степени определяет его конкурентоспособность.

На предприятии используются люминесцентные лампы, которые содержат в себе опасные для организма человека вещества. Поэтому данные лампы следует утилизировать на специализированные предприятия.

А также на предприятии скапливается бытовой мусор, который необходимо вывозить для утилизации. Для этого необходимо составлять договоры на вывоз бытового мусора.

Так как работать приходится с металлом, то необходимо сдавать остатки металла в металлолом. Из-за выделения вредных веществ при сварке, необходимо использовать вентиляцию. С ее помощью можно добиться рассеивания воздуха в помещении. Используется вентиляция, которая по коммуникациям будет выдувать воздух на улицу. Выбросы воздуха из-за малых концентраций вредных веществ специально не очищаются.

## 5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Электросварщик и подсобный рабочий обязаны знать расположение средств пожаротушения и уметь ими пользоваться. Применение инвентаря пожаротушения для других целей запрещается.

Во время работы нельзя допускать попадания искр расплавленного металла и выбрасывать электродные огарки на сгораемые конструкции и материалы. Для огарков необходимо иметь несгораемый ящик.

В помещениях, где производят сварку, запрещается хранить сгораемые и огнеопасные материалы. Если в помещении применяют (или ранее применяли) растворители и другие легкосгораемые воспламеняющиеся материалы, то сварку можно производить только с разрешения администрации и по согласованию с пожарной охраной.

На строительно-монтажной площадке опасными факторами пожара являются: открытый огонь (сварочная дуга, пламя газовой сварки и резки); искры и частицы расплавленного металла, которые возникают при электросварке и резке; повышенная температура изделий, которые подвергаются сварке и резке.

Травмы от пожаров могут возникнуть от воспламенения горючих материалов, находящихся вблизи мест производства сварочных и газорезательных работ, а также от неисправного состояния электрической проводки.

Причинами пожаров технического характера на строительно-монтажной площадке являются: неисправность электрооборудования (короткое замыкание, перегрузки и большие переходные сопротивления); плохая подготовка оборудования к ремонту; несоблюдение графика планового ремонта; износ и коррозия оборудования и т. д. Причинами пожаров организационного характера являются: небрежное отношение с открытыми источниками огня, неправильное хранение пожароопасных веществ; несоблюдение правил пожарной безопасности и т. д.

Согласно «Правилам пожарной безопасности при производстве строительно-монтажных работ» предусматривается комплекс мероприятий по

пожарной безопасности, обеспечивающих снижение опасности возникновения пожара и создание условий быстрой ликвидации пожара на строительномонтажной площадке. Предусмотренные на строительномонтажной площадке мероприятия, устраняющие причины возникновения пожаров, подразделяются на организационные, эксплуатационные, технические и режимные.

К организационным мероприятиям относятся: обучение рабочих сварщиков (резчиков) противопожарным правилам, проведение бесед, инструкций, организация добровольных дружин, пожарнотехнических комиссий, издание приказов по вопросам усиления пожарной безопасности.

К эксплуатационным мероприятиям относятся; правильная эксплуатация, профилактические ремонты, осмотры и испытания сварочного оборудования и устройств и т. д.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных норм и правил при устройстве и установке сварочного оборудования, систем вентиляции, подвода электропроводки, защитного заземления, зануления и отключения.

К режимным мероприятиям относятся: запрещение курения в неустановленных местах, проведение сварочных и других огневых работ в пожароопасных местах.

Пожарную технику согласно ГОСТ 12.4-009—83\*, предназначенную для защиты строительномонтажных объектов, подразделяют на следующие группы, пожарные машины (автомобили, мотопомпы и прицепы); установки пожаротушения; установки пожарной сигнализации; огнетушители; пожарное оборудование; пожарный ручной инвентарь; пожарные спасательные устройства.

К ручным огнетушителям относятся пенные, углекислые, углекислотнобромэтиловые и порошковые.

Огнетушитель химический пенный ОХП-Ю предназначен для тушения пожаров химической пеной, которая образуется в результате воздействия щелочной и кислотной частей заряда.

Огнетушитель ручной углекислотный ОУ-2 предназначен для тушения очага горения различных веществ (за исключением тех, которые могут гореть без доступа воздуха) и электроустановок, находящихся под напряжением.

Для приведения в действие раструб огнетушителя направляют на очаг горения и поворачивают маховичок вентиля до упора.

Углекислотно-бромэтиловые огнетушители предназначены для тушения горячих твердых и жидких металлов, а также электроустановок, находящихся под напряжением.

Порошковые огнетушители предназначены для тушения небольших очагов загораний щелочных металлов, кремнийорганических соединений.

#### 5.4 Организационные вопросы обеспечения безопасности

К электросварочным работам под руководством инструктора допускаются учащиеся не моложе 15 лет, прошедшие инструктаж по охране труда, медицинский осмотр и не имеющие противопоказаний по состоянию здоровья. Длительность рабочего дня сварщика при работе в особо вредных условиях ограничена шестью часами. Сварщикам предоставляется дополнительный отпуск.

Обучающиеся должны соблюдать правила внутреннего распорядка учебного заведения, расписание занятий, установленный режим труда и отдыха.

За каждым учащимся в учебных мастерских закрепляется постоянное рабочее место.

Электросварочные работы производятся в присутствии мастера производственного обучения, под его постоянным руководством и наблюдением.

Допустимая продолжительность работ в учебных мастерских не превышает 3ч в день.

При работе на электросварочном оборудовании необходимо соблюдать правила пожарной безопасности, знать места расположения первичных средств пожаротушения.

О несчастном случае следует уведомить мастера производственного обучения, который сообщает об этом администрации учреждения.

При неисправности оборудования необходимо прекратить работу и поставить об этом в известность мастера производственного обучения.

В процессе работы следует соблюдать правила ношения спецодежды, пользования индивидуальными и коллективными средствами защиты, соблюдать правила личной гигиены, содержать в чистоте рабочее место.

При невыполнении или нарушении инструкции по охране труда учащиеся привлекаются к ответственности, а со всеми обучающимися проводится внеплановый инструктаж по охране труда.

Ответственность за охрану труда, общее состояние техники безопасности и производственной санитарии возлагается на руководителей предприятия, а также цехов и отделов (главных инженеров, главных механиков и инженеров по технике безопасности).

Электросварщик, приступая к работе, должен проверить наличие и исправность оборудования, заземляющих устройств, защитных ограждений и приспособлений.

Электросварщик и подсобный рабочий обязаны содержать в чистоте и порядке рабочее место, не загромождать проходы и проезды, складывать заготовки и готовые изделия в отведенных местах.

Электросварщику и подсобному рабочему запрещается:

- касаться электропроводки и корпусов работающих электродвигателей, установленных на оборудовании;
- самостоятельно подключать электросварочное оборудование к электрической сети;
- стоять под поднятым и перемещаемым грузом;

- производить работы, курить в цехах, на рабочем месте и на участках, где применяют и хранят легковоспламеняющиеся материалы и газы.

Электросварщик и подсобные рабочие обязаны знать правила и приемы оказания первой помощи пострадавшему.

После выполнения сварочных работ электросварщик обязан:

- отключить сварочную аппаратуру от сети;
- отсоединить провод с электродержателем от сварочного оборудования и убрать их для хранения в специально отведенное место;
- тщательно осмотреть рабочее место и принять меры, исключающие возможность возникновения очага пожара;
- в случае возникновения пожара немедленно вызвать пожарную команду и принять меры по ликвидации очага возгорания имеющимися средствами;
- очистить стекло, защищающее светофильтр шлем-маски (щиток) от брызг металла, убрать инструмент и защитные средства в отведенное для хранения место.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения данной работы был проведен анализ существующего инвертора сварочного тока ИСТ-201. Произведена модернизация инвертора за счет замены полупроводниковых ключей и радиатора его охлаждения.

Изготовлен макет силовой части инвертора сварочного тока. Произведена проверка работы транзисторов с помощью нагружения сварочным током экспериментальной установки.

Спроектировали, используя трехмерное моделирование, опытный образец инвертора сварочного тока для промышленного применения.

Удалось уменьшить массу и габаритные размеры инвертора сварочного тока, а так же снизить себестоимость.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1. А.В. Вахрушев. Моделирование конструкции инвертора сварочного тока для сварки намагниченных деталей // Научный рук. А.С. Киселёв. - VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», Томск, 23-27 мая 2016 г.в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ).- 2016.- Т. 2.- с. 139-141.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Корольков П.М. Природа возникновения и методы устранения магнитного дутья при сварке // Сварочное производство. 1998. №5. С. 6-8.
2. Корольков П.М. Причины возникновения магнитного дутья при сварке и способы его устранения // Сварочное производство. 2004. №3. С. 38-40.
3. Сердюк Г.Б. К расчету сварочной дуги в поперечном магнитном поле. // Автоматическая сварка 1960. - №11. – С. 31-38.
4. Бачелис И.А. О расчете отклонения сварочной дуги в постоянном поперечном магнитном поле. // Сварочное производство 1963. - №7. – С. 8-10.
5. Ковалев И.М. Устойчивость сварочной дуги в поперечном магнитном поле // Сварочное производство 1965. - №10 – С. 6-9.
6. Ковалев И.М. Расчет отклонения сварочной дуги в поперечном магнитном поле // Сварочное производство 1965. - №10 – С. 4-9.
7. Бачелис И.А. О поведении дуги в постоянном поперечном магнитном поле // Сварочное производство 1969. - №11 – С. 45-47.
8. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга // М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
9. Смирнов В.В. Оборудование для дуговой сварки: Справочное пособие // Л.: Энергоатомиздат., 1986. – С. 3-10.
10. Патон Б. Е. О напряжении холостого хода трансформатора для электродуговой сварки// Автоматическая сварка, 1956, №1, С. 60-77.
11. Патон Б. Е. Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги. - К: Екотехнологія, 2007, с. 248
12. Гаген Ю.Г., Таран В.Д. Сварка магнитоуправляемой дугой. - М.: Машиностроение, 1970.- 160 с.
13. Пат. 157851 Норвегия, МПК7 В 23 К 9/00. Способ сварки в сильном магнитном поле / Элин Андерсон; заявитель и патентообладатель Норск Гидро. – № 855286; заявл. 27.12.85; опубл. 22.02.88.

14. Wienschenk H. E., Schellhase M. Wiederschlagcharakteristiken von Schweißlichtbogenmitabschmelzen der Elektrode // ZIS-Mitt., 1971, vol. 13 №12 P.1706-1720.
15. Лесков Г. И., Лугин В. П. Переменному току – дорогу в сварку. // Приок. книж. изд-во. Тула, 1969, С. 59
16. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2001. – 384 с.
17. Гордынец А.С. Управление процессом дуговой сварки при возмущающем воздействии магнитного поля.: Дис. канд. техн. наук. Томск. 2012. – 159 с.
18. Elcodis electronic components distributor [электронный ресурс] <http://elcodis.com/parts/2661249/CM300DY-12NF.html>, свободный.
19. Открытое акционерное общество «Электровыпрямитель» [электронный ресурс] <http://elvpr.ru/poluprovodnikprib/ohladiteli/O-55.pdf>, свободный.
20. [электронный ресурс] <https://ru.wikipedia.org/wiki/варистор>, свободный.
21. Чернышев А.А., Иванов В.И., Аксенов А.И., Глушкова Д.И. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники. – М: «Энергия», 1980. – 217 с.
22. A. Scotti, C. O. Morais, and L. O. Vilarinho, “The effect of out-of-phase pulsing on metal transfer in twin-wire GMA welding at high current level, ”Welding J., vol. 85, no. 10, pp. 225–230, Oct. 2006.
23. T. Ueyama, T. Onawa, M. Tanaka, and K. Nakata, “Occurrence of arc interference and interruption in tandem pulsed GMA welding—Study of arc stability in tandem pulsed GMA welding (Report 1),” Quart. J. Jpn. Welding Soc., vol. 23, no. 4, pp. 515–525, 2005.

24. R. P. Reis, “Assessment of low current tandem GMAW processes with waveform control and with aid of laser beam,” Ph.D. dissertation, Federal Univ. Uberlandia, Uberlandia, Brazil, 2009.
25. R. P. Reis, A. Scotti, J. Norrish, and D. Cuiuri, “Investigation on welding arc interruptions in the presence of magnetic fields: Welding current influence,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 40, no. 3, pp. 870–876, Mar. 2012.
26. T. Ueyama, T. Uezono, T. Era, M. Tanaka, and K. Nakata, “Solution to problems of arc interruption and arc length control in tandem pulsed gas metal arc welding,” *Sci. Technol. Welding Joining*, vol. 14, no. 4, pp. 605–614, May 2009.
27. G. E. Cook and H. E. E. H. Eassa, “The effect of high-frequency pulsing of a welding arc,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 5, pp. 1294–1299, Sep. 1985.

## 1 LITERATURE REVIEW

Investigation on welding arc interruptions in the presence of magnetic fields: arc length, torch angle and current pulsing frequency influence

In tandem gas metal arc welding (GMAW), two wires are fed through two electrically isolated contact tips into a single weld pool. In this high-productivity welding process, the existence of magnetic interactions between the arcs is intrinsic, and users are generally aware of it, but whether the effects of these interactions are positive or negative remains unclear. For instance, there is still some uncertainty on the benefit of using a delay between the current pulses applied in the wires or any other pulsing synchronism approaches [22]. Another subject that has been given little attention is the occurrence of arc interruptions (mostly in the trailing arc), generally when the process is used with low current levels (out of position welding, for example). If frequent and/or lengthy, these arc interruptions generate lack of deposition and/or fusion defects [23], [24]. In previous work, the influence of the welding current on the resistance of gas tungsten arc welding (GTAW) arcs to extinction was studied to gain an understanding of the mechanisms involved in arc interruptions and to find ways of avoiding them [25]. The results showed that GTAW arcs are extinguished by external magnetic fields, but as the welding current is increased, the arcs become more difficult to extinguish, which is in accordance to the results presented for the tandem GMAW by Ueyama et al. [26]. However, additional factors might influence the arc extinction phenomenon caused by another welding arc. Examples would be the arc length, the torch (arc) angle, and the use of high-frequency current pulsing.

High-frequency current pulsing, in particular, has been claimed as able to improve welding arc stiffness. GTAW arc pressure on the weld pool in high-frequency current pulsing conditions has been simulated as a measure of arc stiffness [27]. According to the authors of the study, the use of high-frequency current pulsing increases the arc pressure as much as ten times that of a dc arc with the same arc

power input. Schnellhase shows that the GTAW arc pressure gain is significant up to a pulsing frequency of about 5 kHz [28]. Despite reports showing that high-frequency current pulsing is able to improve the arc pressure over the weld pool, nothing is mentioned with regard to any relationship between this technique and arc stiffness in the presence of external magnetic fields.

Considering the promising characteristics of high-frequency current pulsing and the lack of information with regard to the influence of the arc length and torch (arc) angle on the behavior of welding arcs in the presence of magnetic fields, this paper presented here aims to study the influence of these factors on arc stiffness and the susceptibility of the arc to interruptions by external magnetic fields.

Because of the large number of interrelated factors involved, it is difficult to assess the interactions between the tandem GMAW arcs and to draw firm conclusions on the exact cause of arc interruptions. Consequently, a simplified approach was used for these experimental studies. A single independently controlled GTAW arc operating in a constant-current mode is subjected to a sudden change of an external magnetic field to assess the resistance of the GTAW arc to magnetically induced extinction. In order to allow a comparative analysis of the results, the methodology and experimental rig used here are the same as those used in previous work [25]. For convenience, a brief description of this same methodology and experimental rig is provided here.

An electromagnet was used to generate the external magnetic field that would otherwise be produced by a second arc in tandem GMAW, thereby excluding any other form of influence that the second arc would have on the arc under investigation. An adjustable 48-V dc power source supplied the electromagnet coil current to generate the required magnetic field strength. The coil voltage was taken as the experimental reference for the magnetic field as it is directly proportional to the coil current (Ohm's law) and is more conveniently measured.

The experimental objective was to observe the tendency for arc extinction in the presence of externally applied magnetic fields. To simplify analysis, the magnetic field acting on the arc was considered to be the value of the magnetic flux density

(measured in the air by a teslameter) at the center point between the electromagnet poles and with the testing plate placed 2 mm below the electromagnet. The magnetic flux density responsible for extinguishing the arc was considered as a measure of arc stiffness and will be referred to as the arc resistance to extinction. For a given arc condition, the higher the magnetic flux density needed to extinguish the arc, the higher the stiffness of this arc and the greater the arc resistance to extinction. The magnetic flux density was used rather than the calculated magnetic force acting on the arc, since the later changes along with the arc length variation as the arc is deflected, which would make the analysis of results more complex and confusing.

An aluminum arm was used to hold the electromagnet parts perpendicular to the torch, perpendicular to the welding direction, and adjacent to the arc region. A 40-mm interpole distance was used throughout the tests, since it provided reasonable values of magnetic flux density. The conversion from voltage applied to electromagnet  $V$  to magnetic flux density  $M$  for a 40-mm interpole distance was carried out using (1) devised in previous work [25]. The relationship was linear with a correlation index of 0.9993, i.e.

$$M = 0.154 * V - 0.0946. \quad (1)$$

A low-carbon-steel (AISI 1010) test plate (300×50×2 mm) was tightly preset 2 mm below the electromagnet and 10 mm above a moving welding table (at a welding travel speed of 41 cm/min), whereas the torch and electromagnet were firmly held in place. The GTAW torch was oriented perpendicular to the test plate and a EWTh-2 electrode (diameter =2.4 mm; tip angle =30<sup>0</sup>) shielded by argon (14 L/min) was used in direct current electrode negative (DCEN) with a secondary chopper electronic power source. During the tests, the magnetic field was rapidly applied when the arc was around the mean point of the test plate, allowing enough time for arc stabilization. The effects of various welding parameters were evaluated in this paper with the arc being deflected backward. For each parameter tested, it was observed whether different settings would lead to any change of the arc resistance to the extinction limit curve illustrated in figure 1. This curve was defined as a function of the welding current by Reis et al [25]. This map of the arc resistance to extinction

was used as a reference to evaluate the effect of the welding parameters studied in this paper. High-speed filming, which was synchronized with the arc electrical signals sampled at 2 kHz, was carried out as an additional tool of investigation.

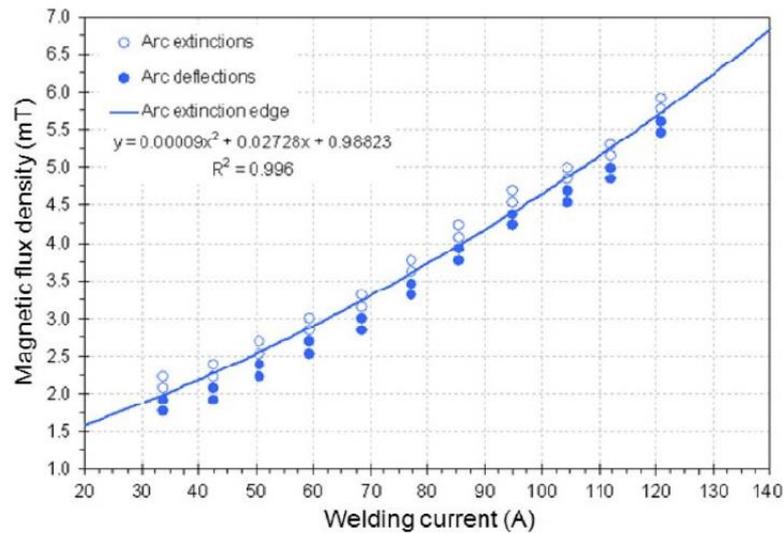


Figure 1 - Relationship between the GTAW welding current and resistance to arc extinction when the arc is deflected backward (arc length = 10mm; shielding gas = Ar at 14 L/min; torch angle = 90<sup>0</sup>; electrode = EWTh-2, 2.4 mm, 30<sup>0</sup> tip) [4]

To assess the influence of the arc length, the welding current was initially set at 50 A. This is a typical background current in tandem pulsed GMAW, where arc extinction problems are known to occur [24]. Two higher currents were also tested (80 and 100 A). The arc length was increased and decreased by 5 mm in relation to the nominal 10-mm length used for the arc resistance to the extinction. For each arc length, the respective resistance to extinction was found by progressively increasing the electromagnet coil voltage in successive tests until arc extinctions occurred, then evaluating the corresponding flux density using (1). The results are listed in Table I.

Table 1 - Magnetic flux densities required to cause arc extinction at various currents and arc lengths (torch angle = 90<sup>0</sup>)

Arc length, mm	Set welding current, A	Mean welding current, A	Coil voltage setting, V	Magnetic flux density at the arc extinction limit, mT
5	50	50.1	35	5.30

15	50	50.8	8	1.14
5	100	95.4	48	no extinction*
15	100	93.8	15	2.22
5	80	76.9	47	7.15

\*48-V coil voltage (maximum value) was unable to extinguish the arc.

As shown in figure 2, the arc length setting vertically displaces the extinction limit curve. If the arc length is decreased, its resistance to extinction is increased. This result is in agreement with known physical effects, where a longer electrical conductor carrying a current (in this case, the GTAW arc) produces greater force when exposed to an external magnetic field. The increased force produces greater arc deflection. The data in figure 2 indicate that the resistance to arc extinction is more evident when the arc length changes from 10 to 5 mm than when the arc length is changed from 15 to 10 mm. This indicates that nonlinear factors (arc surface area, for instance) might play a role in the arc resistance to extinction.

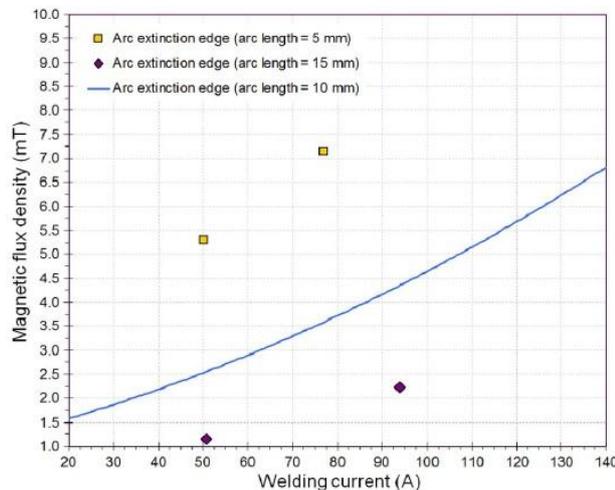


Figure 2 - Influence of the GTAW arc length on the arc extinction limit curve (torch angle =90<sup>0</sup>)

Figure 3 shows the extinction of a 50-A 5-mm-long arc upon application of a suitably intense magnetic field. To emphasize any characteristic of the phenomenon, the magnetic field was produced using 37 or 2 V above the correspondent arc extinction limit for the given welding conditions. This extinction event was similar to

that previously described by Reis et al. [25]. The previously described extinction event exhibited a 10-mm long arc and required approximately 100 ms to extinguish after the coil voltage is applied. In the event shown in figure 3, approximately 300 ms needed to reach the moment of arc extinction. This indicates that the resistance to extinction is significantly increased for shorter arcs. It is worth mentioning that the arc voltage values measured at the moment of extinction (this being done over a number of repeated tests) did not seem to have any correlation with the applied coil voltage or magnetic flux density, supporting the results previously presented by Reis et al [25].

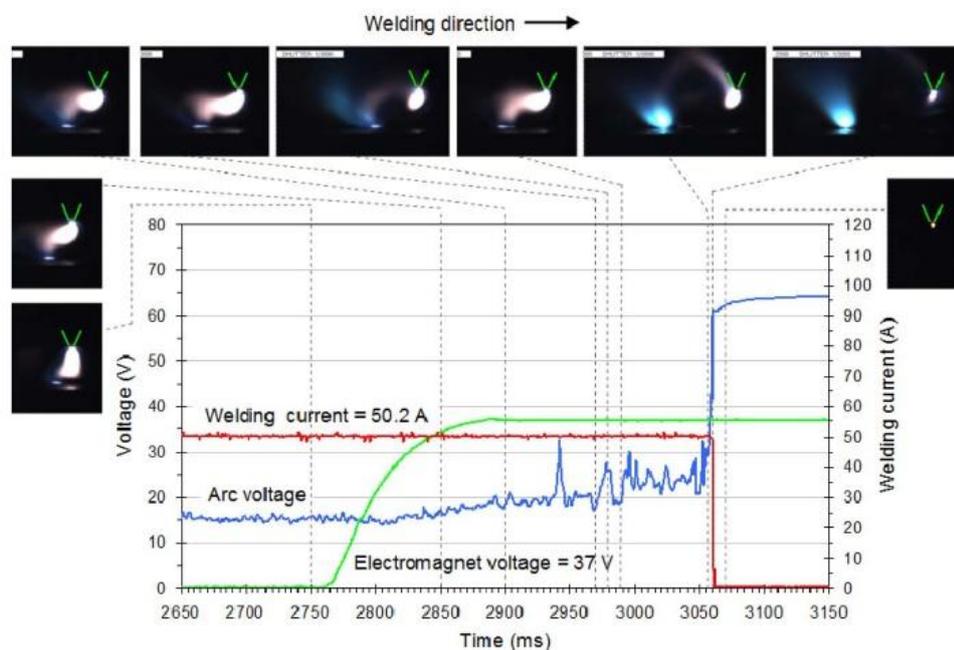


Figure 3 - Extinction of a 5-mm-long GTAW arc (welding current =50.2 A; torch angle =90<sup>0</sup>)

The influence of the torch angle on the resistance to arc extinction was evaluated. Table II shows the results, whereas figure 4 presents a map of the phenomenon.

TABLE 2 - Torch angles evaluated and respective magnetic flux densities needed to cause arc extinction

Torch angle, <sup>0</sup>	Set welding current, A	Mean welding current, A	Coil voltage setting, V	Magnetic flux density at the arc extinction limit, mT
---------------------------	------------------------	-------------------------	-------------------------	---

65	50	50.3	19	2.84
115	50	50.7	26	3.91
65	80	77.6	25	3.76
115	80	78	41	6.23

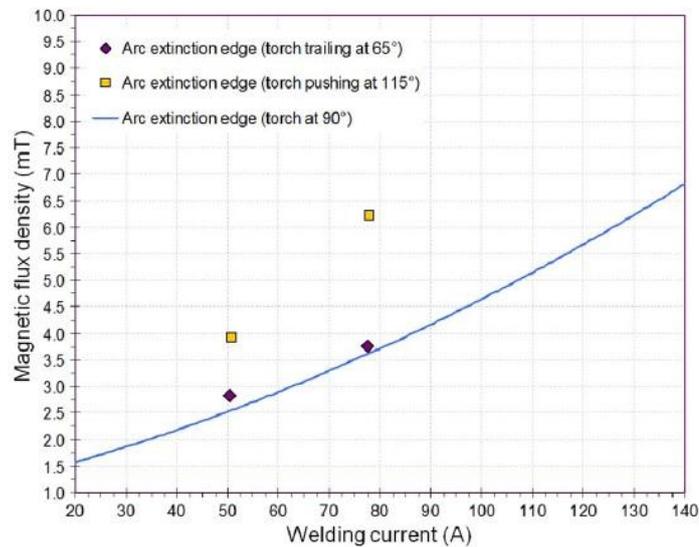


Figure 4 - Influence of the GTAW torch angle on the arc extinction limit curve

If the torch (or arc) is set to “push” the weld pool (115°), it increases the arc resistance to extinction (displaces the extinction limit curve upward). In contrast, if the torch (or arc) is placed to “pull” the weld pool, the arc resistance to extinction seems to remain unchanged. An extinction event for the “push” condition is shown in figure 5. Bearing in mind that the arc is being deflected backward, if the arc is set to “push” the weld pool, then it needs to be deflected up to the vertical position first and subsequently further backward to a point where it is extinguished. This is indicated by the small drop in arc voltage when the electromagnet voltage (and magnetic field) is first applied. Subsequently, as the electromagnet voltage continues to rise and the arc is being deflected backward, the arc voltage starts to rise, and finally, the extinction event takes place.

It would be expected that “pulling” angles would lower the arc extinction limit curve, since the arc would be already “deflected” backward. This did not possibly occur as a consequence of the way the arc was positioned in the magnetic field; as the electrode tip was centralized in relation to the electromagnet poles, part

of the arc was under the influence of lower magnetic flux densities. Thus, the electromagnet voltage level, which is able to extinguish the arc, had to be increased to compensate any fall in the magnetic flux density. The same problem (one part of the arc being subjected to lower magnetic flux than others) may have also occurred when the arc was “pushing” the weld pool. However, in this case, the effect of displacing the extinction limit curve upward would be less pronounced because the arc was driven to regions of more intense magnetic flux density anyway as it was deflected backward. The arc voltage values at the moment of extinction did not appear to be influenced by changes in the torch angle.

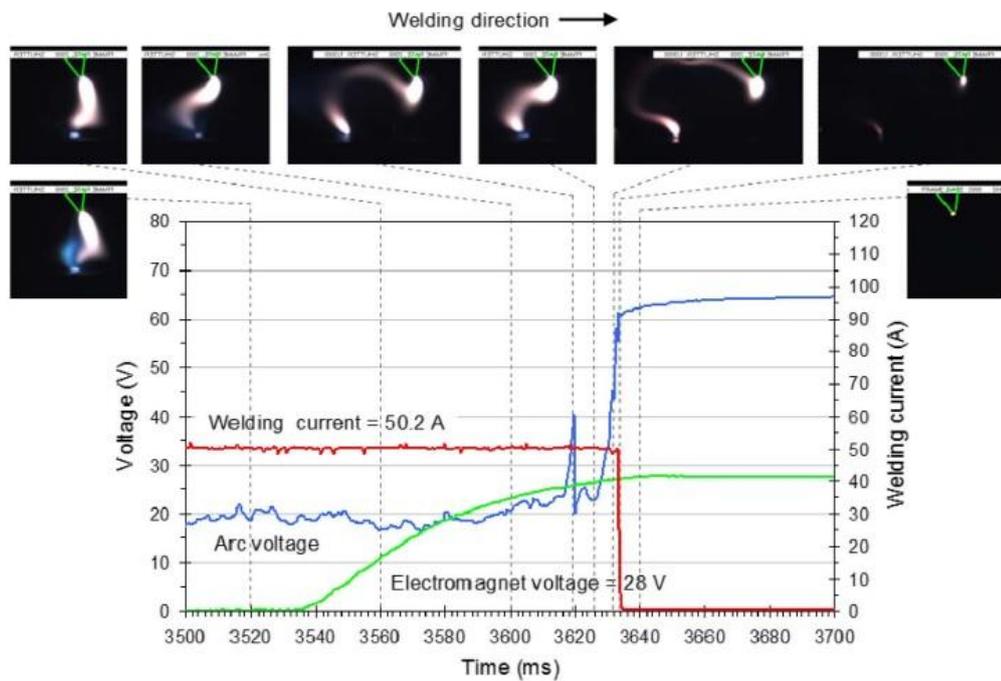


Figure 5 - Extinction of a 50-A GTAW arc when it is set to push the weld pool ( $115^{\circ}$ )

TABLE 3 - High-frequency current pulsing parameters and respective magnetic flux densities needed to cause the gtaw arc extinction (arc length =10 mm; torch angle =  $90^{\circ}$ )

Frequency, Hz	$I_p$ , A	$t_p$ , ms	$I_b$ , A	$t_b$ , ms	Mean welding current, A	Coil voltage setting, V	Magnetic flux density at the arc extinction limit, mT
500	70	1.0	30	1.0	49.8	15	2.22
500	120	1.0	80	1.0	95.8	30	4.53

1000	70	0.5	30	0.5	49.1	12	1.76
1000	120	0.5	80	0.5	96.2	25	3.76

$I_p$  – peak current;  $t_b$  – peak current time;  $I_b$  – base current;  $t_b$  – base current time

Considering the lack of information on possible effects of high-frequency current pulsing on the arc resistance to extinction under magnetic fields, this potential relationship was investigated. Table III summarizes the experimental results, whereas figure 8 presents the effects on the arc resistance to the extinction limit curve. For the conditions tested (two levels of mean current), the use of high-frequency current pulsing, in general, tended to move the arc extinction limit curve downward, and the higher the pulsing frequency, the weaker the arc resistance to extinction. This result contradicts existing literature, which states that high-frequency current pulsing increases arc stiffness [26], [27].

Despite the limited number of tests accomplished, the decrease in resistance to arc extinction due to the use of high-frequency current pulsing might possibly be due to the fact that the welding current falls to a low value  $I_b$  during each pulsing cycle. By analyzing the electrical transients and high-speed camera images, it was verified that the arc was always extinguished when the welding current was at its base current value (during  $t_b$ ). Considering the results shown in figure 1, it is reasonable to expect that the arc would be extinguished during the base current period, where it exhibits the lowest resistance to extinction. From this point of view, the possibility of arc extinction might be related to the level of base current used, to the number of times the current goes to this level and/or to the time it remains at this level. Despite the fact that the current goes to the low level more times with a pulsing frequency set at 1000 Hz, for a given time period, the current remains at this low level the same time as when the pulsing frequency is set at 500 Hz (considering instantaneous base-to-pulse and pulse-to-base times). Therefore, it is difficult to make any definitive statement with regard to the reasons for the fall in the arc resistance to extinction as the current pulsing frequency is increased, and further investigation on this topic is necessary.

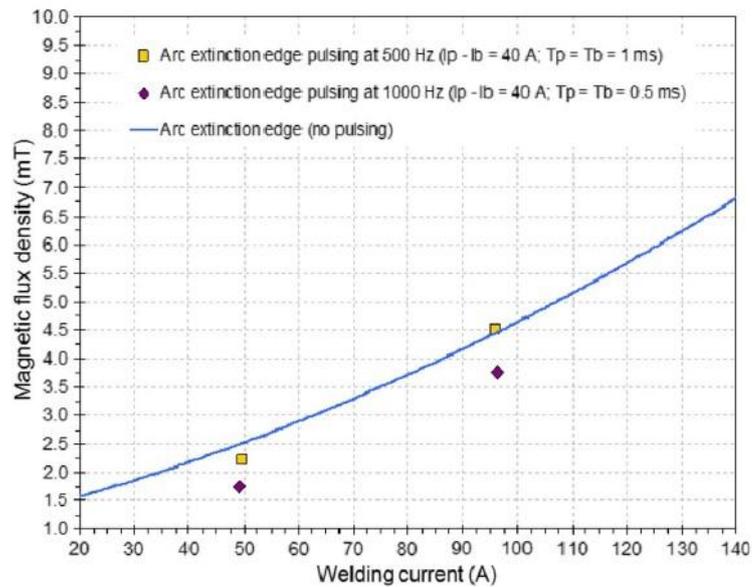


Figure 6 - Influence of high-frequency current pulsing on the arc extinction limit curve (arc length = 10mm; torch angle = 90°)

As an example of arc extinction at high-frequency current pulsing circumstances, figure 7 shows an arc being extinguished by an external magnetic field when the welding current is set to pulse at 1000 Hz. It is possible to observe the extinction pattern seen so far; as the arc is deflected, the arc voltage shows some spikes (the arc almost reaches extinction and recovers) and, at some point, the arc is extinguished (the welding current drops to zero, and the arc voltage rises to the open-circuit value). Just before extinction, it is possible to see how the arc diminishes (becomes darker in the fourth frame from the left) and grows (becomes brighter in the fifth frame from the left), apparently for the same deflection. In the fourth frame (base current), the arc appears weaker (deionized) and, as a consequence, the respective arc voltage is high. As the next pulse follows (fifth frame), the arc seems stronger (reionized) and, as a consequence, the arc voltage falls. This pattern repeated throughout almost all pulses for all tests carried out, regardless of the pulsing frequency. This behavior shows that arc ionization is a result of a balance between voltage (strength of collisions between particles) and current (number of collisions between particles).

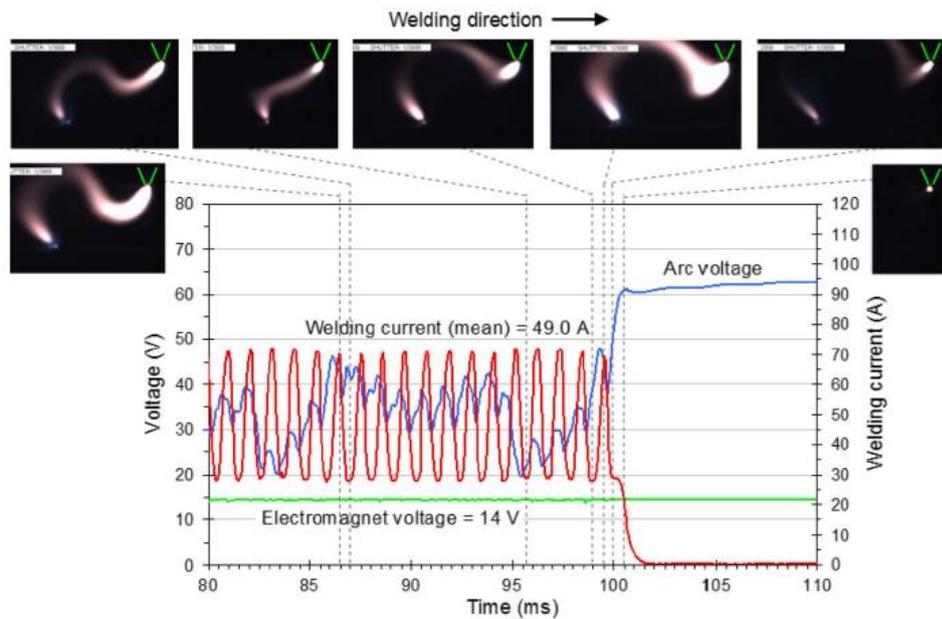


Figure 7 - A 50-A GTAW arc extinguished when the welding current is set to pulse at 1000 Hz (arc length=10 mm; torch angle=90<sup>0</sup>) (data acquisition at 20 kHz)

By observing the high-speed images, all arc extinctions appeared to occur in the middle of the plasma column. A model is proposed to explain this phenomenon based in figure 8, which presents a scheme for the balance of thermal energy in a GTAW arc plasma column environment.

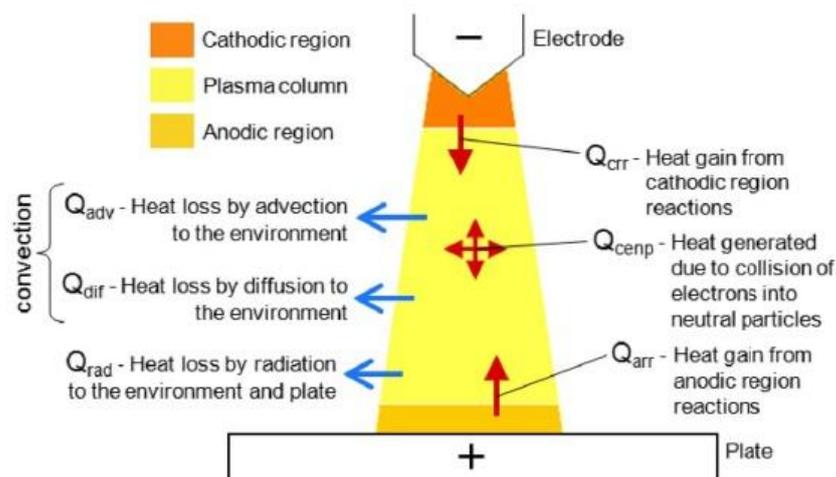


Figure 8 - Schematic heat balance at the plasma column of a GTAW arc

The plasma column exists if the total heat generated in the arc and entering into it matches the heat leaving this arc region [see (2)]. The loss of heat at the plasma column takes place by advection, diffusion, and radiation. However, it is

common to find references to convection, conduction, and radiation, which would be, to some extent, incorrect, since convection comprises heat advection (due to the movement of gas, i.e., natural or forced) and heat diffusion (also called conduction). The diffusion heat transfer in welding arcs is expected to be low. Thus, it would be expected that the loss of heat at the plasma column mainly takes place by advection and radiation. The advection term here accounts for the heat loss due to the shielding gas flow (there is a difference of velocity between the gas flow and the plasma jet) and for the heat loss due to the movement of matter inside the arc (caused by the plasma jet). A fraction of the heat lost by advection goes to the plate. In terms of contribution to the plasma column heat losses, as cited by Allum, the heat loss by convection is the most significant. However, there are controversies; for instance, Tanaka and Lowke state that radiation is the predominant heat loss mechanism in the plasma column, i.e.,

$$Q_{\text{crr}} + Q_{\text{cenp}} + Q_{\text{arr}} = Q_{\text{adv}} + Q_{\text{dif}} + Q_{\text{rad}} \quad (2)$$

According to the model, the arc resistance to extinction is controlled by deionization and reionization processes, which simultaneously and constantly occur during any stable welding arc. Plasma column deionization is due to lowered atomic energy as a consequence of heat losses. Reionization takes place as a result of inelastic shocks between the travelling electrons and nonionized particles (including the deionized ones) along the arc. The shocks transfer energy to the particles, enabling matter to change from the local temperature to the ionized state. The more energy needed by the atom to become ionized (which depends on plasma characteristics, such as ionization potential, specific heat, etc.), the higher the difference of potential (DoP), which is popularly called voltage, required. In addition, the smaller the number of electrons travelling (lower current), the higher the DoP required (not only as a consequence of a smaller number of shocks but also as a reduction in the input heat from the anodic and cathodic areas, which turns lesser for lower currents). When the arc is lengthened for any reason, such as by magnetic deflection, its surface area enlarges, and therefore, the heat loss increases. It should be recognized that treating the arc as being equivalent to a solid conductor may be an

imprecise approach. In a solid conductor, the electrical resistance is linked to the difficulty for the movement of electrons through its structure (the larger the cross-sectional area, the lower the DoP). In the case of plasma columns, the “resistance” seems to be mostly related to the need for reionizations (the larger the cross-sectional area, the higher the DoP). Thus, the rise of voltage (DoP) as the arc is deflected is due to the necessity of increasing its ionization level to compensate for an increasing deionization. In conclusion, a likely explanation for the arc extinctions is based on the following reasons.

1) During the elongation of the arc, its surface area proportionally increases and more voltage (DoP) is required.

2) If a constant voltage power source is used, the welding current progressively takes lower values (less shocks of electrons). As the power source cannot provide higher voltage, the arc is not able to be sustained by the low number of low potential inelastic shocks any longer (low current and low voltage).

3) If a constant-current power source is used, the welding current is kept at the same value (same likelihood of collisions), regardless of the voltage demanded by the arc. As the power source has a limited maximum output voltage (open-circuit value) at a certain length, the arc is no longer able to be sustained by the potential energy of the inelastic shocks.

4) One way or another, when the arc is lengthened beyond the steady-state condition, its radius becomes smaller (narrower arc). This is a natural geometric rearrangement of the arc looking for less energy to be sustained. The narrower the conducting column, the lesser the needs of DoP, since the arc surface area decreases as does the deionization process.

5) When this narrowing reaches its critical size, the arc is extinguished. Extinction usually occurs before reaching zero current in the case of a constant voltage power source or before reaching the open-circuit voltage in the case of a constant-current power source.

6) The arc extinction happens at the middle of the plasma column, wherein the heat availability is the lowest, in contrast to the vicinities of the electrode and plate.

Thus, the influence of the welding current and arc length on the resistance to arc extinction can be better understood if it is considered that the arc is extinguished due to excessive heat loss (the heat balance is broken) in the plasma column. In the case of the welding current, this factor influences the heat generated or entering the plasma column (heat input terms). Considering the almost linear shape of the arc extinction limit curve (see figure 1), it appears that the current linearly related heat terms are more pronounced. It is quite reasonable to think in that way, since the heat produced in the cathodic region (current linearly dependent) represents most of the heat in the arc (highest temperatures close to the DCEN electrode), and a significant part of this heat is transferred to the plasma column. With regard to the influence of the arc length, it influences the output heat terms; as any arc heat loss is surface area dependent, any increase in the arc length implies in an increase in the plasma column heat losses.

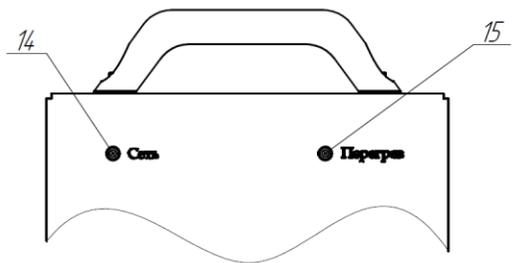
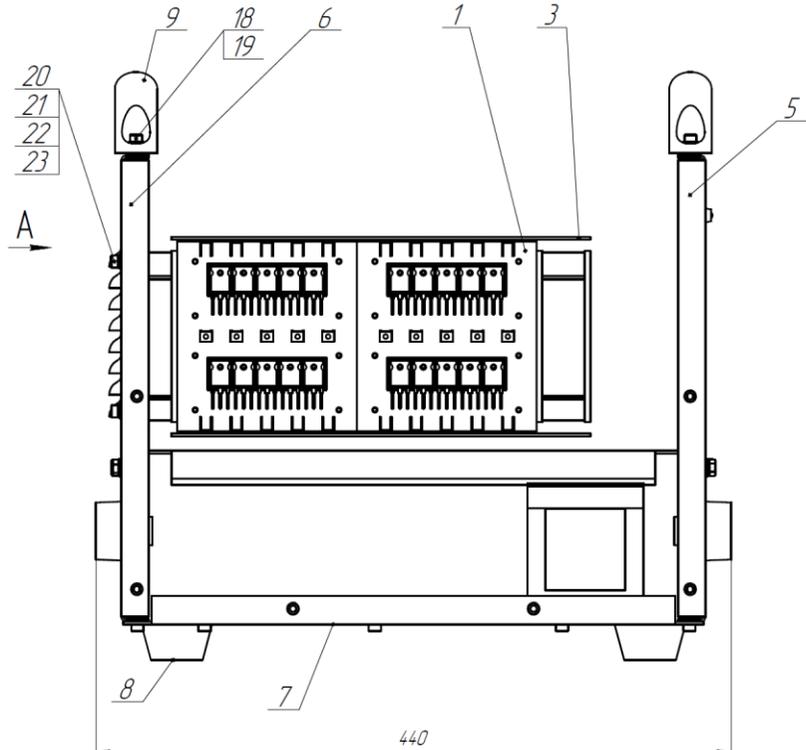
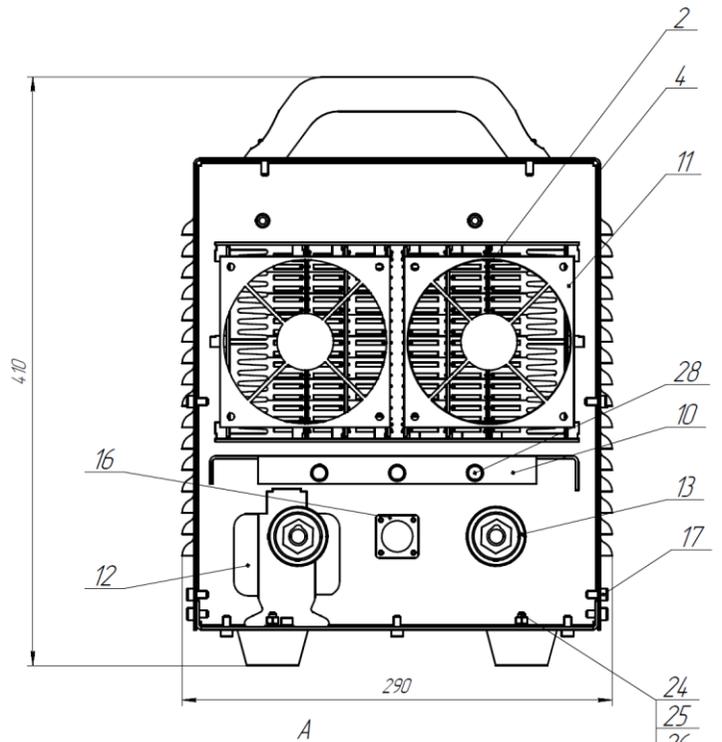
Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание						
<i>Документация</i>												
A2			ФЮРА.683151.001СБ	Сборочный чертеж								
<i>Сборочные единицы</i>												
A3	1		ФЮРА.683151.100СБ	Силовая плата	4							
A3	2		ФЮРА.683151.200СБ	Варисторная плата	6							
<i>Детали</i>												
A4	3		ФЮРА.683151.001.001	Плата модуля	2							
B4	4		ФЮРА.683151.001.002	Крышка корпуса	1							
B4	5		ФЮРА.683151.001.003	Задняя стенка	1							
B4	6		ФЮРА.683151.001.004	Передняя стенка	1							
B4	7		ФЮРА.683151.001.005	Дно	1							
B4	8		ФЮРА.683151.001.006	Ножки	4							
B4	9		ФЮРА.683151.001.007	Ручка	2							
B4	10		ФЮРА.683151.001.008	Балка	1							
<i>Стандартные изделия</i>												
		11		Вентилятор SUNON A2123HBT.GN	4							
		12		Трансформатор	1							
		13		Силовые разъемы СКРП-50	4							
		14		Лампочка сеть	1							
		15		Лампочка перегрев	1							
		16		Разъем питания 36В	1							
<b>ФЮРА.683151.001</b>												
Изм. Лист		№ докум.		Подп.	Дата							
Разраб. Проб.		Вахрушев										
Н.контр. Утв.												
<b>Инвертор сварочного тока</b>				Лит.			Лист			Листов		
							1			2		
				НИ ТПУ ИЧК ОТПС 1ВМ41								
				Копировал						Формат А4		



ФЮРА.683151.001СБ

Задняя панель не показана

Крышка корпуса не показана



Технические характеристики ИСТ:  
 Номинальный сварочный ток 200 А;  
 Масса 36 кг;  
 Габариты (Д×Ш×В): 440×290×410 мм;  
 Напряжение питающей сети 220 В

Лист 1 из 1  
 Сварочный аппарат  
 Инвертор  
 ФЮРА.683151.001СБ

ФЮРА.683151.001СБ					Лист	Масса	Листов
Инвертор сварочного тока							12
Лист	Лист	№ детали	Полт.	Изм.	Лист		
Разработ	Воскрешев				Листов 1		
Проф.					НИ ТПУ ИИК		
Т.контр.					ОТПС 18/М4.1		
Исполн.					Формат А2		
Черт.					Копировал		

ФЮРА.683151.001.001

Левб. примен.

Справ. №

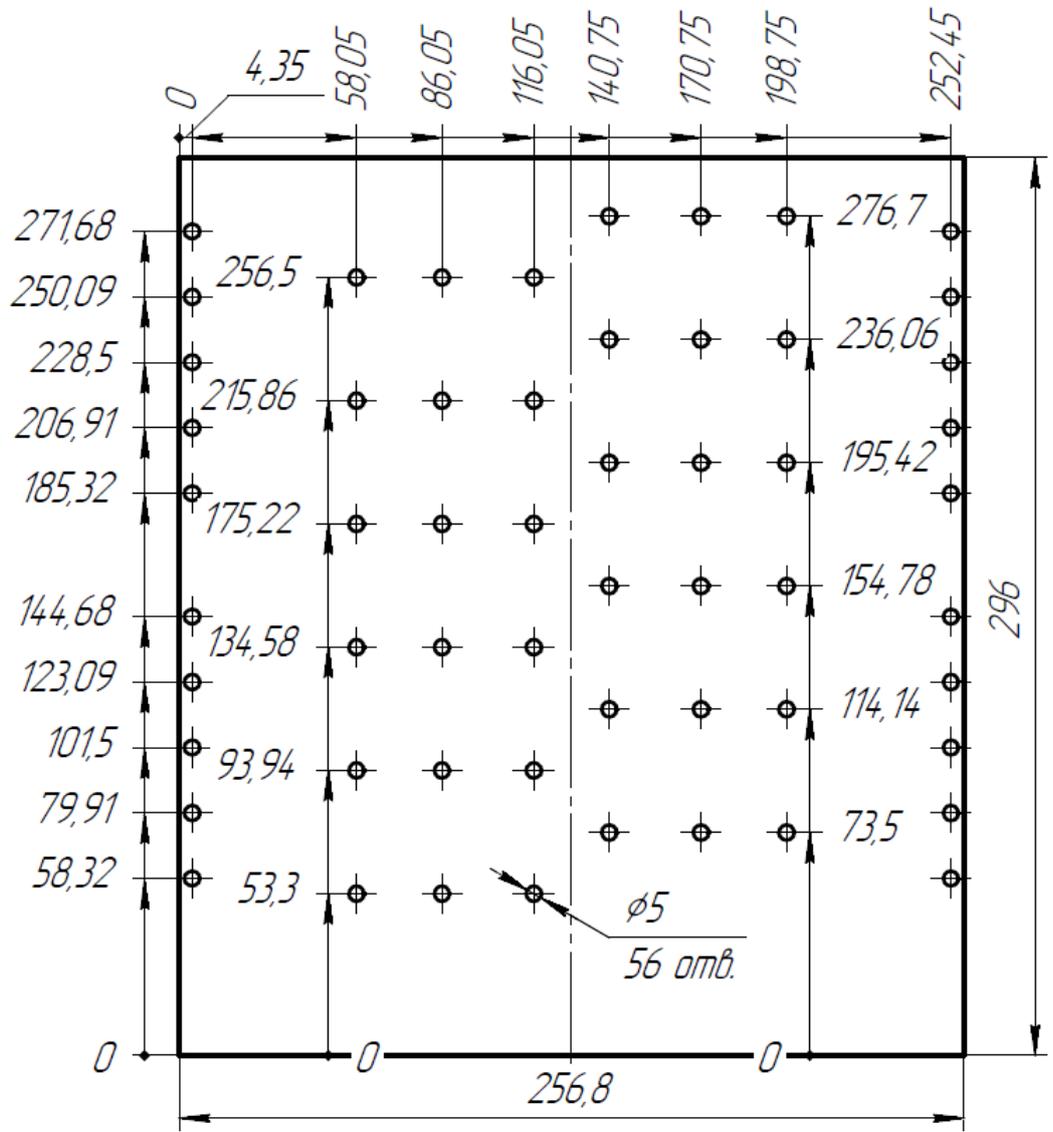
Подп. и дата

Инд. № д/дл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инд. № подл.



ФЮРА.683151.001.001

Плата модуля

Текстолит Б-2 ГОСТ 2910-74

Лист	Масса	Масштаб
		1:2
Лист		Листов 1
НИ ТПУ ИНК		ОТПС 1ВМ41

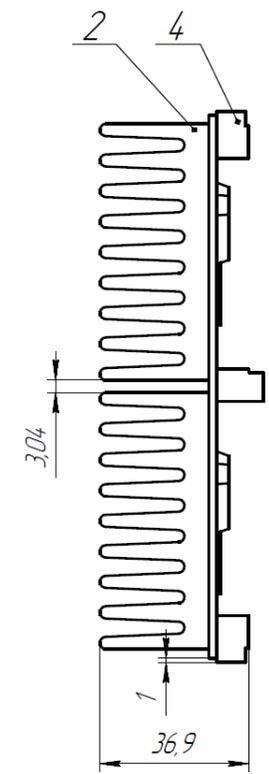
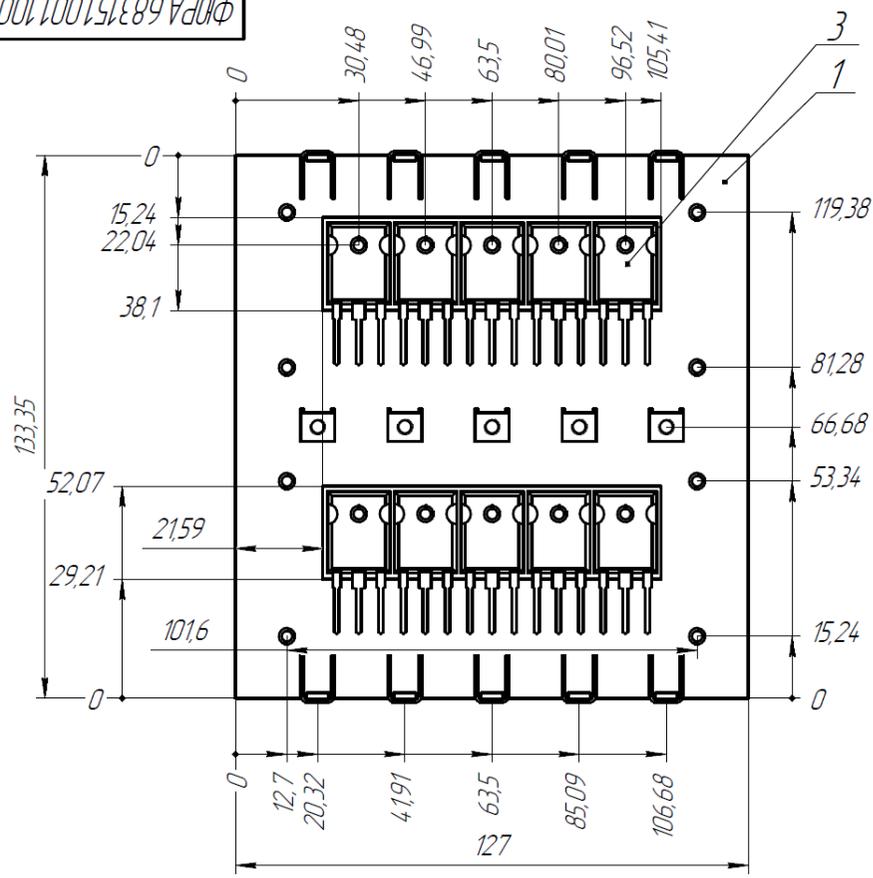
Копировал

Формат А4



ФЮРА.683151.001.100СБ

Изд. № листа  
Лист и дата  
Взам. инв. №  
Изд. № докум.  
Лист и дата  
Склад. №  
Перв. примен.



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Вахрушев			
Проб.				
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

ФЮРА.683151.001.100СБ

Силовая плата

Лист	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов	1
НИ ТПУ ИНК ОТРС 1ВМ41		

Копировал

Формат А3



