

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование кафедры)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических материалов

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: «Оптимизация условий сварки с учётом электрических и энергетических показателей контактных машин»

| | | | |
|--------------|---|-------|------------------|
| Студент(ка) | <u>А.Д. Порваткин</u> (И.О. Фамилия) | _____ | (личная подпись) |
| Руководитель | <u>А.С. Климов</u> (И.О. Фамилия) | _____ | (личная подпись) |
| Консультанты | <u>В.Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия) | _____ | (личная подпись) |

Руководитель программы: д.т.н, профессор А.И. Ковтунов _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ Г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н, профессор В.В. Ельцов _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ Г.

Тольятти 2018

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА КОНТАКТНОЙ СВАРКИ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩЕНИЙ | |
| 1.1 Возмущения при контактной сварке | 6 |
| 1.2 Стабильность формирования ядра сварной точки в условиях действия возмущений | 10 |
| 1.3 Выводы по первому разделу | 17 |
| 2 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНЫХ МАШИН | |
| 2.1 Измерение составляющих сопротивления контактных машин | 18 |
| 2.2 Моделирование фазового управления на контактных машинах | 21 |
| 2.3 Измерения на конкретной сварочной машине | 24 |
| 3 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКОЙ | |
| 3.1 Моделирование электрических процессов при контактной сварке в условиях действия возмущений | 40 |
| 3.2 Управление процессами контактной точечной и шовной сварки | 53 |
| 3.3 Исследование теплового баланса при контактной сварке | 57 |
| 3.4 Выводы по третьему разделу | 65 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 66 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 67 |

ВЕДЕНИЕ

Контактная сварка обладает технико-экономическими показателями, значения которых выигрышно отличаются от других способов получения неразъёмных соединений. Это и объясняет столь широкое применение контактной сварки в массовом производстве [1, 2]. В автомобилестроении использование контактной сварки достигает 90 %, при этом каждый год выполняется несколько миллиардов сварных точек, из которых приблизительно 30 % выполняют «про запас», перестраховываясь от низкого качества сварки [3].

Получению стабильного качества при контактной сварке затруднено вследствие многочисленных возмущений: шунтирования тока, износа сварочных электродов, нагрева вторичного контура, внесения в него ферромагнитных масс и т.д. [4, 5, 6]. Повышению стабильности качества контактной сварки посвящены работы российских и зарубежных учёных: А.А. Чакалева, Ф.А. Аксельрода, Н.Н. Рыкалина, Б.Д. Орлова, П.Л. Чулошникова, А.С. Гельмана, Д.С. Балковца, К.А. Кочергина, Thomas.W. Eagar, H.S. Cho, K.I. Johnson, S.A. Gedeon, D.W. Dickinson и др.

Компенсацию возмущений при контактной сварке можно произвести методами активного контроля. За контролируемый параметр принимают выделяющуюся между сварочными электродами энергию, сварочный ток, тепловое расширение металла и другие параметры, которые в той или иной мере могут характеризовать качество сварки. Значительная часть научных разработок посвящена контролю тепловых процессов при контактной сварке с применением прямого или косвенного измерения температуры деталей [7...10].

Существенное повышение стабильности качества контактной сварки может быть получено при коррекции параметров процесса сварки в системах автоматического регулирования, которые реализуются современными вычислительными средствами. В качестве примеров можно привести

разработки ЗАО «Электрик-МИКС» (Россия), «Селма» (Россия), «Bosch Rexroth» (Германия), «ENTRON Controls» (США), «Welding Technology Corporation» (США), Spotron (Япония), «Dengensha America» (США) [11...14].

Зачастую правильность протекания процесса контактной сварки и качество получаемых соединений могут быть оценены путём анализа результатов мониторинга параметров режима (тока сварки, напряжения между электродами, перемещения электродов и т.д.). В этом случае необходимо учитывать, что измерение нескольких параметров в условиях действия электромагнитных помех может внести существенную погрешность в полученные данные и значительно усложнить аппаратную часть систем управления. Контроль энергетических и обобщённых параметров контактной сварки не позволяет в полной мере учитывать особенности формирования соединений, особенно в условиях действия различных технологических возмущений. Качество контактной сварки существенно страдает от действия таких опасных возмущений, как износ сварочных электродов и шунтирование тока сварки, которые достаточно сложно оценить и компенсировать [4, 15...18].

Из-за недостаточной эффективности управления процессами контактной сварки при возмущениях приходится прибегать к контролю качества соединений. В массовом производстве основным методом контроля контактной сварки является визуальный и разрушающий. При проведении визуального контроля оценивают внешний вид сварных точек, пропуски и видимые дефекты. При проведении разрушающего контроля проверяют усилие на отрыв, выдерживаемое сварной точкой. Далее производят ремонт подвергнутых проверке деталей и их запуск в производство [19].

После внедрения ГОСТ Р ИСО 9001 недопустимым стало использовать в производстве товарной продукции детали, которые были использованы при проведении разрушающего контроля. Все детали кузова после проведения разрушающего контроля должны быть списаны и

утилизированы, это приводит к значительному увеличению материальных затрат на проведение контроля качества. Сейчас мировые производители деталей кузовов автомобилей полностью отказываются от применения разрушающего качества из-за его экономической и технологической бесперспективности [20]. Уменьшение доли разрушающего контроля может быть достигнуто путём применения достоверных методов неразрушающего контроля и повышения стабильности процесса сварки за счёт применения современной аппаратуры управления.

Проблема качества контактной сварки может быть решена при изучении тепловых процессов, протекающих в зоне сварного соединения, электрических процессов в сварочной оборудовании. Ранее проведённые исследования [21, 22, 23] показали возможность управления сварочным током и энергией сварки с использованием длительности включенного состояния тиристорov в качестве обратной связи. Это позволяет существенно упростить сварочные регуляторы и повысить их помехоустойчивость.

На основании вышеизложенного следует сформулировать **цель диссертационного исследования** как повышение качества контактной сварки за счёт внедрения систем автоматического управления и способов контроля качества, использующих новые параметры обратной связи.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА КОНТАКТНОЙ СВАРКИ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩЕНИЙ

1.1 Возмущения при контактной сварке

Контактная сварка является электротермическим процессом, механизм протекания которого достаточно сложен для понимания. В этом механизме взаимосвязаны между собой параметры сварки, изменение которых в процессе сварки может быть описано математически. В результате протекания контактной сварки должно быть получено сварное соединение, имеющее заданные геометрические размеры [24]. Для получения такого соединения необходимо, чтобы при пропускании сварочного тока и нагреве было сформировано такое температурное поле, которое обеспечит литую зону заданных размеров и с оптимальными металлургическими изменениями в зоне термического влияния.

При жёстком программировании основных параметров сварки нельзя достигнуть стабильности температурного поля, следовательно, нельзя стабилизировать и качество сварных соединений. Это происходит из-за целого ряда возмущений (рис. 1.1), к которым следует отнести [25]:

1. Изменение свойств свариваемых деталей (электро- и теплофизических характеристик, геометрических размеров и состояния свариваемых поверхностей).

2. Изменение технологических параметров – сварочного тока, длительности сварочного цикла, сварочного усилия. При помощи аппаратных средств в лабораторных условиях эти параметры могут быть обеспечены с достаточной точностью. Однако на практике в массовом производстве присутствует снижение давления в пневматической системе цеха, падение напряжения питающей сети на десятки процентов. Это может привести к отклонению реальных режимов сварки от заданных.

3. Наличие монотонных изменений в электрическом и силовом контурах при износе контактной сварочной машины.

4. Изменение условий протекания процесса контактной сварки –сетевое напряжение, полное сопротивление сварочного контура, наличие шунтирования тока. В условиях массового производства может наблюдаться значительный нагрев контура контактной машины, что вызывает дополнительное снижение её полезной мощности.

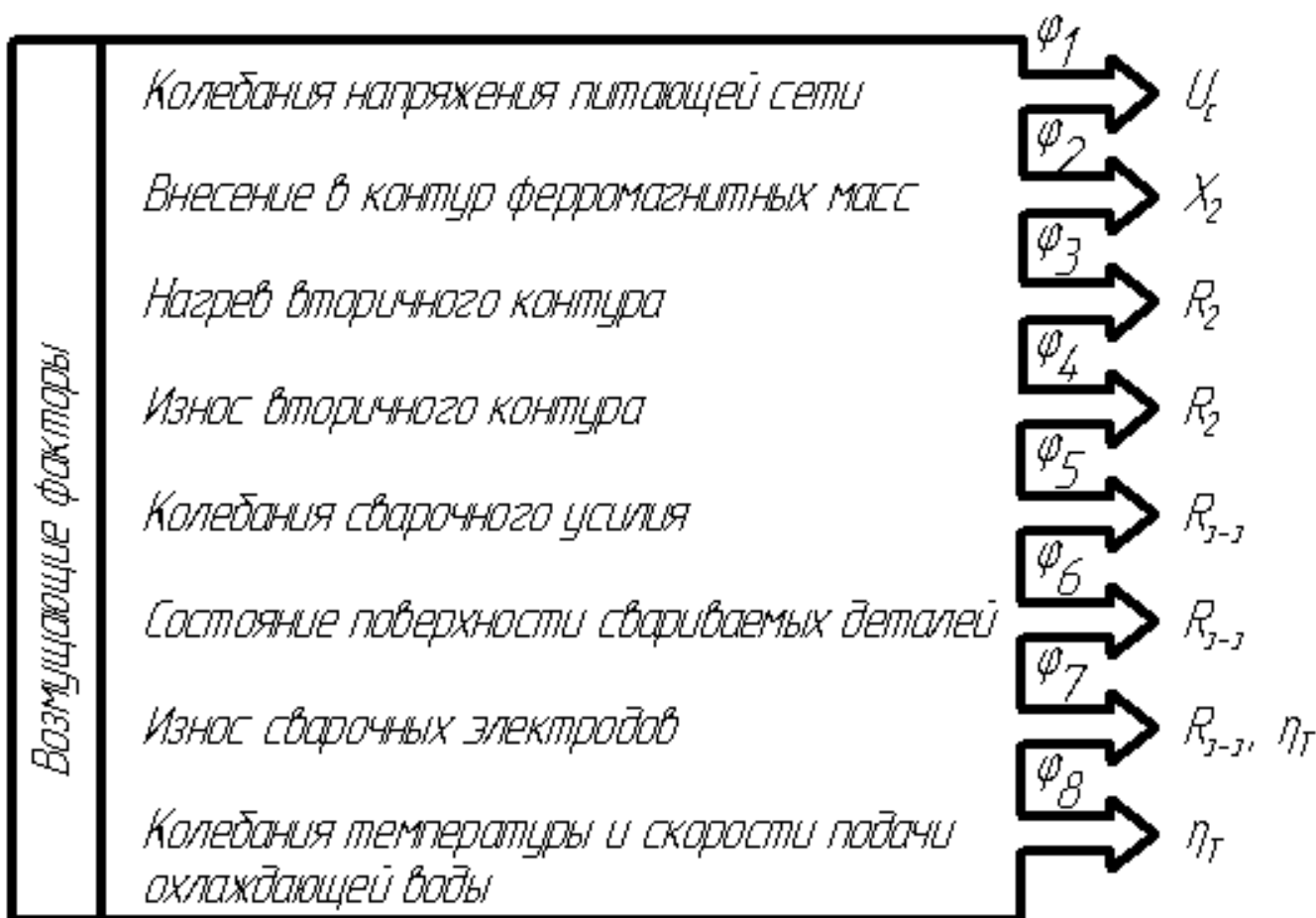


Рисунок 1.1 – Возмущающие факторы процесса контактной точечной сварки

Малое время протекания нагрева при контактной сварке, влияние на него большого числа возмущений и наличие значительных электромагнитных помех существенно затрудняют проведение прямых измерений температурного поля при контактной сварке. Следовательно,

главная цель управления контактной сваркой – формирование оптимального пространственно-временного температурного поля – недостижима.

Невозможность достижения главной цели управления приводит к необходимости достижения альтернативных целей, в качестве которых можно выделить:

- 1) стабилизация условий сварки, что позволяет при сохранении параметров сварки около заданных значений компенсировать действие большей части возмущений;
- 2) компенсирование возмущений, приводящих к нарушению процесса контактной сварки.

Колебание напряжения питающей сети. Выделяющееся при сварке тепло определяется величиной тока и напряжением питающей сети. При изменении тепловыделения существенно изменяется глубина проплавления, размеры ядра сварной точки и страдает качество сварки.

Опасным следует признать уменьшение напряжения питающей сети, которое может привести к снижению прочности сварной точки. При повышенном напряжении также страдает качество сварки, так как в этом случае происходит образование выплесков жидкого металла, прожогов и т.д.

Снижение напряжения питающей сети довольно частое явление в производстве. Напряжение изменяется как плавно, так и скачками в пределах - 25%...+ 15% от номинального. Это существенно влияет на протекание процесса сварки, в значительной степени снижает качество сварных соединений.

Изменение сопротивления вторичного контура сварочной машины. Величина сварочного тока зависит от значений активного и индуктивного сопротивления контактной машины. При их изменении происходит изменение величины тока и тепловыделения между электродами.

Основная причина, по которой изменяется сопротивление вторичного контура контактной машины, это введение в него ферромагнитных масс в

процессе сварки изделий с большими габаритными размерами. Это может привести к уменьшению величины сварочного тока и прочности точек.

Особенно сильно этот эффект проявляется в процессе сварки изделий, которые необходимо надевать на хобот машины (сварка обечаек). Введение в контур машины ферромагнитных масс не только увеличивает его индуктивное сопротивление, но также повышает величину активного сопротивления контура. Увеличение активного сопротивления может быть объяснено потерями на гистерезис и вихревые токи. Изменяющиеся активное и индуктивное сопротивления контактных машин - одно из главных и опасных возмущений, которое часто встречается на производстве.

Изменение размеров рабочей поверхности электродов (диаметра электродов). Диаметр сварной точки определяется диаметром применяемых электродов, изменение которого влечет за собой изменение качества сварки. В процессе интенсивной сварки происходит износ рабочей части электродов, что приводит к изменению конфигурации и размеров рабочей (контактной) поверхности электродов. Величина износа электродов определяется свариваемым материалом, чистотой поверхности деталей, режимами сварки, интенсивностью охлаждения электродов, материалами электродов.

Износ сварочных электродов может привести к увеличению диаметра контактной поверхности, что влечёт за собой изменение характера нагрева свариваемых деталей и температурного поля. Увеличение поверхности соприкосновения электрода с деталями приводит к уменьшению плотности сварочного тока и, следовательно, глубины проплавления и размеров литого ядра. Прочность сварных точек при этом снижается

Изменение усилия сжатия электродов. Усилие сжатия электродов оказывает влияние на величину сопротивления свариваемых деталей, и на пластическую деформацию металла в зоне сварки. Изменение сопротивления участка «электрод-электрод» вызывает изменение количества выделяющегося тепла и нарушение нормального нагрева металла в ходе сварки.

Увеличение усилия сжатия электродов приводит к уменьшению сопротивления участка «электрод-электрод» и уменьшение энергии, выделяющегося в месте сварки. Повышение давления вызывает увеличение истинной площади контакта электрода и детали, уменьшает плотность тока и соответственно понижает прочность точек. Уменьшение давления также вызывает понижение прочности и значительный разброс по прочности. Это происходит из-за значительных выплесков жидкого металла, уменьшения размеров литого ядра и нестабильности процесса сварки.

Шунтирование сварочного тока. При сварке различных конструкций величина тока, который протекает через свариваемую точку, изменяется из-за ответвления части тока. Он может проходить по сваренным точкам или по случайным контактам между листами, образуя вследствие наличия неровностей на этих листах. Это уменьшает выделение энергии в месте сварки. Шунтирование может проявляться очень сильно и существенно снижать качество сварки. Шунтирование значительно снижает прочность сварных точек вплоть до появления полного непровара.

1.2 Стабильность формирования ядра сварной точки в условиях действия возмущений

Основным параметром, характеризующим качество соединения, выполненного контактной точечной сваркой, является диаметр литого ядра, который определяет размеры области взаимного расплавления свариваемых деталей. Усилие разрушения сварного соединения мало зависит от наличия внутренних дефектов. Снижение диаметра ядра резко ухудшает эксплуатационные характеристики соединения. Поэтому основной задачей дефектоскопии контактной точечной сварки является определение диаметра литого ядра взаимного расплавления.

Уменьшение диаметра литого ядра точки может происходить из-за отклонения параметров режима сварки от заданных значений (снижения

силы сварочного тока и времени его протекания, увеличения усилия сжатия), а также от некачественно подготовленной поверхности свариваемых деталей, загрязнения электродов, увеличения их рабочей поверхности и других причин [33, 34].

Условно методы контроля качества контактной точечной сварки можно разделить на две группы – методы приемочного контроля, позволяющие контролировать уже готовое изделие, и активные методы, позволяющие производить контроль в процессе сварки [31].

Активный контроль осуществляют по параметрам процесса сварки. При этом имеется отрицательная обратная связь по регулируемой величине, с помощью которой обеспечивается стабилизация параметра регулирования. К параметрам, по которым осуществляется контроль, относятся: сварочный ток, падение напряжения на электродах, сопротивление участка цепи между электродами, мощность, энергия [4].

Качество соединений при контактной сварке зависит от стабильности тепловыделения в расплавленном ядре сварной точки, на которую имеет влияние целый ряд факторов. К таким факторам относятся отклонения, колебания, несинусоидальность напряжения питания, наличие окислов, загрязнений в сварном соединении, изменение полного сопротивления сварочной (вторичной) цепи за счет внесения в нее ферромагнитных масс, износ, окисление, изменение рабочей части электродов и т. д. [28]. Стабилизация тепловыделения в сварном контакте приведет к стабилизации процесса сварки, и, соответственно, к обеспечению качества сварного соединения.

В большинстве находящихся в эксплуатации контактных машин в настоящее время не производится стабилизация тепловыделения в зоне контакта. Однако данная проблема известна, и еще с 70-х годов прошлого века предпринимаются попытки ее решения. В работах [28, 35...40] описаны возможные способы стабилизации тепловыделения при контактной сварке. При этом наиболее распространенными являются системы управления (СУ),

поддерживающие заданную энергию в сварочном контакте. Основными недостатками существующих систем стабилизации тепловыделения в сварочном контакте являются:

- необходимость измерения сварочного (вторичного) тока и напряжения в сварочном контакте [35, 36, 39, 40], что вызывает ряд сложностей;
- при измерениях в первичной цепи контролируемые параметры, например, коэффициент мощности, определяются по открытию углов тиристоров [28, 37, 38], что снижает точность измерений, а наличие громоздких эмпирических формул снижает точность;
- в большинстве случаев – невозможность учета изменения полного сопротивления сварочной цепи, в том числе вызванного внесением в нее ферромагнитных масс.

В работе [41] предложена автоматическая система, позволяющая управлять временем контактной точечной сварки по величине энергии, затрачиваемой на расплавление ядра. С помощью разработанной математической модели процесса сварки исследовано влияние параметров её режима и вводимой энергии на диаметр литого ядра.

Одним из наиболее применимых для моделирования сварочных и родственных процессов является пакет COSMOS/M. Это построенная по модульному принципу автономная система анализа методом конечных элементов. Она включает модули для решения линейных и нелинейных, статических и динамических задач анализа механических конструкций, а также полевых задач теплопроводности [42].

Модель теплового расчёта при контактной точечной сварке представлена на рис. 1.2. Она состоит из 587 узловых точек и 472 конечных элементов типа PLANE2D – четырехузловых элементов.

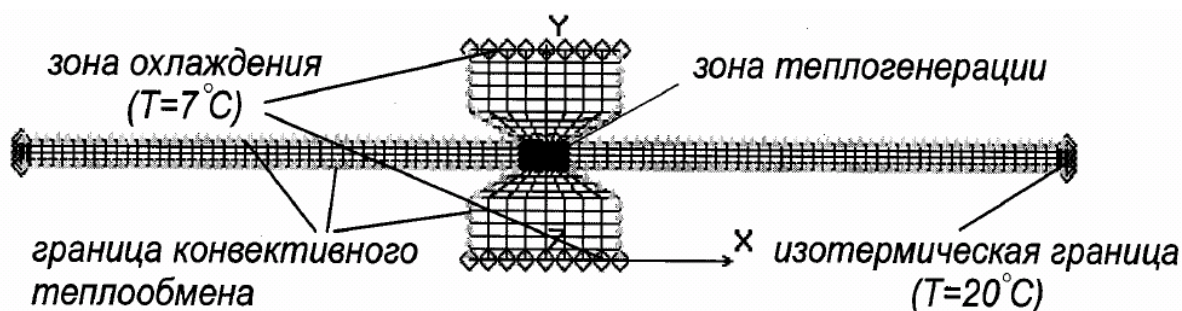


Рисунок 1.2 – Конечно-элементная модель теплового расчёта при контактной точечной сварке

Для формирования геометрии модели при изменении толщины свариваемых деталей, размеров электродов разработана программа на языке Delphi. Представляет интерес картина распределения теплового поля в момент отключения сварочного тока, когда ядро разогрето до максимальных температур. Она позволяет определить диаметр литого ядра точки. На рис. 1.3 представлена картина распределения температур при сварке деталей из стали 08кп толщиной 2 + 2 мм, режимы сварки $I = 10$ кА, $t = 0,3$ с. Сходимость процесса при расчёте достигалась за три-четыре итерации. При этом диаметр литого ядра точки составил 6,4 мм.

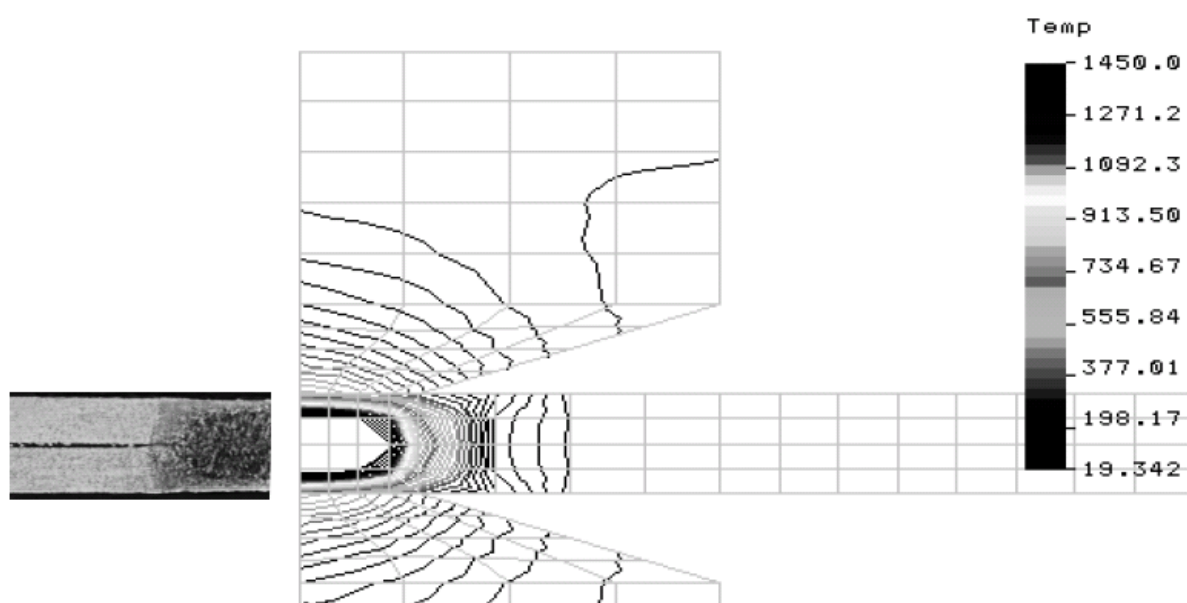


Рисунок 1.3 – Картина распределения температур во время выключения сварочного тока и макрошлиф сварного соединения

Для оценки адекватности модели сваривали листы из низкоуглеродистой стали типа 08кп толщиной 2 + 2 мм на машине переменного тока МТ–1617. Сварочный ток варьировали от 8 до 13 кА, время сварки от 0,1 до 0,4 с. Сравнивали геометрию литого ядра, полученного при моделировании с макрошлифами соединений (рис. 1.3).

По результатам 30 опытов получили удовлетворительное совпадение размеров литой зоны в указанном диапазоне параметров. Результаты статистической обработки данных показали, что погрешности расчётных значений диаметров литого ядра и зоны термического влияния составляют 12,1 и 9,4 % соответственно.

Разработанная модель позволяет определить оптимальные режимы сварки и величину вводимой энергии, соответствующие рекомендуемым значениям литого ядра. В случае сварки пластин одинаковой толщины из низкоуглеродистых сталей рекомендуемые значения размеров литого ядра точки приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Рекомендуемые [41] размеры электродов и диаметра литого ядра

| Толщина пластин s , мм | Диаметр электрода $D_э$, мм | Диаметр контактной поверхности электрода $d_э$, мм | Минимальный диаметр литого ядра d_{min} , мм | Максимальный диаметр литого ядра d_{max} , мм |
|--------------------------|------------------------------|---|--|---|
| 1,0 | 12 | 5 | 4,00 | 5,00 |
| 2,0 | 20 | 8 | 6,35 | 7,94 |
| 3,0 | 25 | 10 | 8,32 | 10,40 |

Наиболее просто регулятор энергии реализуется по управлению временем сварки. При этом его влияние на размеры литого ядра при сварке деталей из стали 08кп, полученное на основании расчёта по представленной выше методике, приведено на рис. 1.4.

В качестве системы сбора данных при реализации регулятора энергии использовали универсальное устройство компании «Нэйшнл Инструментс»

USB-6009, имеющее восемь каналов аналоговых входов, два канала аналоговых выходов, частоту оцифровки 48 кГц, максимальное входное напряжение ± 20 В.

Сварку производили на однофазной машине переменного тока МТ-1617 с регулятором цикла сварки РКС-801. В качестве измеряемых параметров использовали мгновенное значение сварочного тока $i_{св}$ и напряжение между электродами $u_{ээ}$. Для регистрации $i_{св}$ применялся датчик тока на основе преобразователя Холла. Для снятия $u_{ээ}$ использовали метод компенсации наводки от прохождения сварочного тока при помощи встречновключенного напряжения u_k , снимаемого с индуктивности, установленной в контуре сварочной машины (рис. 1.5).

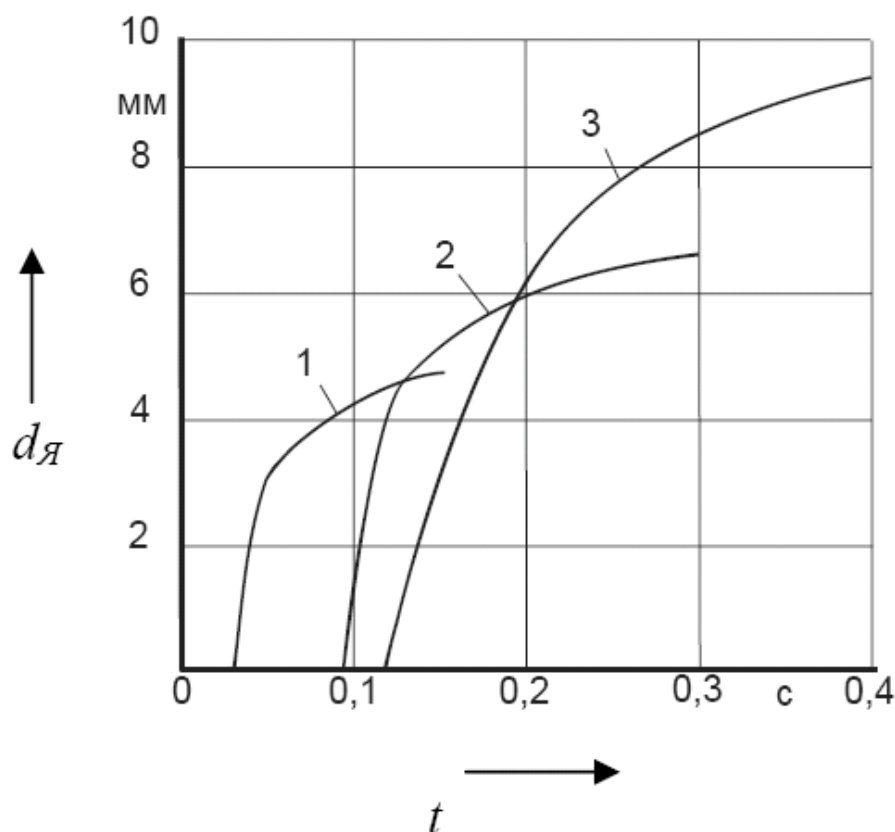


Рисунок 1.4 – Влияние времени сварки на размеры литого ядра для различных толщин свариваемых деталей: 1) $s = 1 + 1$ мм; 2) $s = 2 + 2$ мм; 3) $s = 3 + 3$ мм

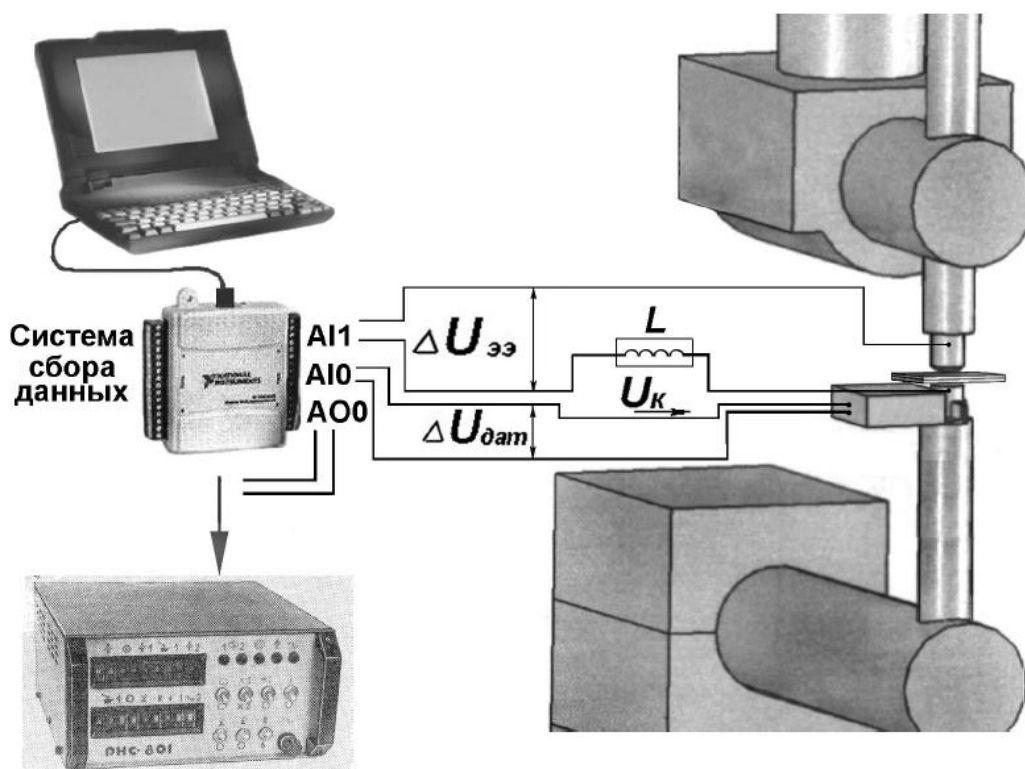


Рисунок 1.5 – Система регистрации параметров процесса контактной точечной сварки

Энергию, выделяемую в зоне сварки, определяли выражением

$$Q = \int_0^{t_{св}} |u_{эз}| \cdot |i_{св}| dt$$

С помощью разработанной системы активного контроля исследовали связь между выделяемой в зоне сварки энергией и диаметром литого ядра точки. При этом сваривали пластины из стали 08кп толщиной 1+1; 2+2; 3+3 мм до достижения определённого значения энергии. После этого соединение разрушалось с целью установления размера литого ядра.

Корреляционная связь между энергией и диаметром литого ядра, позволяющая определить пороговые значения энергии для различных толщин свариваемых деталей (см. табл. 1.1), приведена на рис. 1.6.

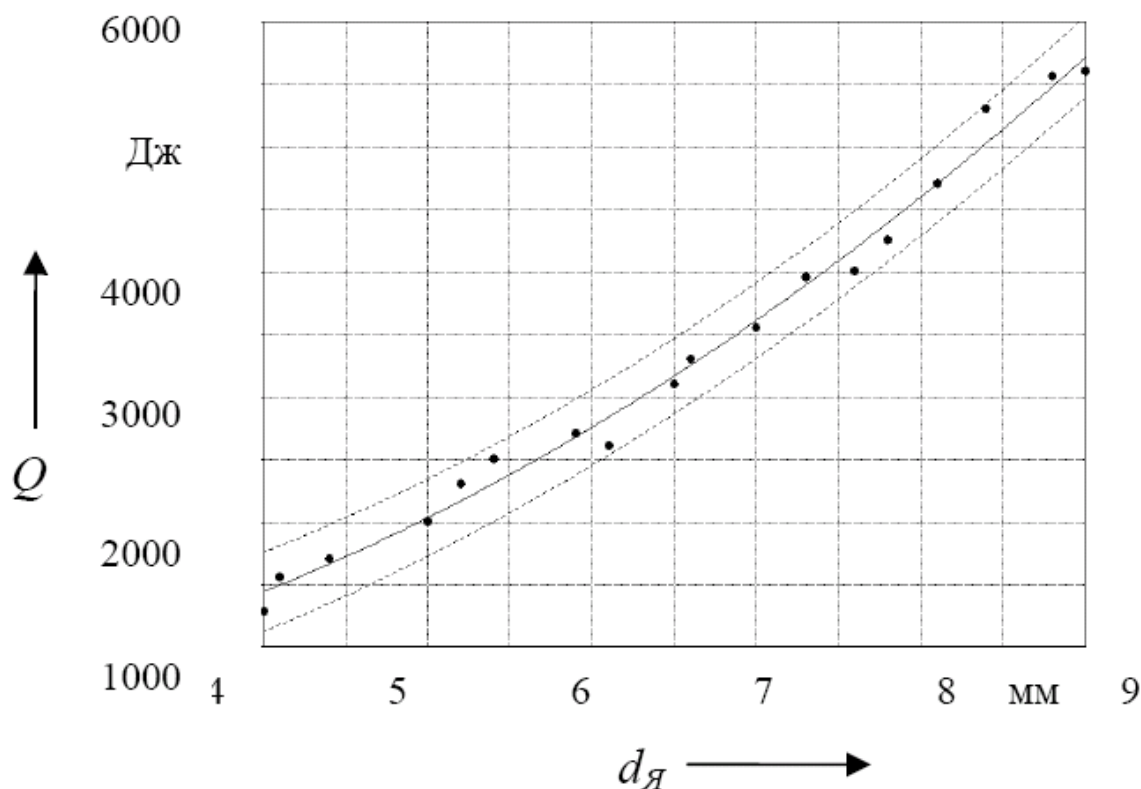


Рисунок 1.6 – Зависимость энергии от диаметра литого ядра [41]

1.3 Выводы по первому разделу

1. Соединение при контактной сварке формируется в условиях действия возмущений, вызывающих отклонение параметров тепловыделения от заданных значений и существенно снижающих стабильность качества сварки в условиях массового производства.

2. Частичная компенсация возмущений при контактной сварке возможна при автоматическом регулировании процесса сварки, при этом в качестве измеряемых параметров целесообразно использовать электрические параметры (ток сварки, сопротивление участка «электрод-электрод» и тепловыделение на нём).

3. Измерение и регулирование электрических параметров требует математического описания электрических процессов при контактной в контактной машине и разработки методики экспериментального определения параметров контактной машины и процесса сварки.

2 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНЫХ МАШИН

2.1 Измерение составляющих сопротивления контактных машин

Для осуществления диагностики контактной сварки, измерения тепловыделения и сопротивления участка «электрод-электрод» необходимо знание активного $R_{2к}$ и индуктивного $X_{2к}$ сопротивлений сварочной машины в режиме короткого замыкания [21, 26].

Величины $R_{2к}$ и $X_{2к}$ могут быть определены из опыта короткого замыкания, при котором производят включение контактной сварочной машины с углом открытия тиристорov α , измерение действующего сетевого напряжения U_c , тока во вторичном контуре I_2 и длительности λ протекания импульса сварочного тока, после чего активное и индуктивное сопротивления вычисляют как

$$R_{2\hat{\epsilon}} = \frac{U_{\hat{n}} \cdot k_i}{I_2 \cdot K_{\delta}} \cdot \cos \varphi, \quad (2.1)$$

$$X_{2\hat{\epsilon}} = \frac{U_{\hat{n}} \cdot k_i}{I_2 \cdot K_{\delta}} \cdot \sin \varphi, \quad (2.2)$$

где K_T – коэффициент трансформации на данной ступени сварочного трансформатора;

k_i – коэффициент регулирования сварочного тока;

$\cos \varphi$ - коэффициент мощности.

Существенно упростить процедуру измерения при определении составляющих полного сопротивления контактных машин позволяет способ [27], предусматривающий перед включение машины в режиме короткого замыкания с заданными значениями углов открытия тиристорov, измерение действующего тока во вторичном контуре и построение графиков функций $X_{2к}=f(R_{2к})$. Координаты точки пересечения этих графиков соответствуют

искомым значениям $R_{2к}$ и $X_{2к}$. При построении графиков функций $X_{2к}=f(R_{2к})$ соблюдают условие:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_2 = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \int_0^{\lambda/\omega} i_2^2(t) dt} \\ i_2(t) = \sqrt{2} I_{\pi} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \exp(-\omega t \operatorname{ctg} \varphi) \\ \sin(\lambda + \alpha - \varphi) / \sin(\alpha - \varphi) = \exp(-\lambda \operatorname{ctg} \varphi) \\ I_{\pi} = \frac{U_c}{K_T} / \sqrt{R_{2к}^2 + X_{2к}^2} \\ \varphi = \operatorname{arctg}(X_{2к} / R_{2к}) \end{array} \right. , \quad (2.3)$$

где I_{π} - установившейся полнофазный ток;

ω - угловая частота напряжения сети;

$i_2(t)$ - мгновенный ток во вторичном контуре.

Осуществление этого способа требует применения сложного математического аппарата и численных методов для построения графиков функций $X_{2к}=f(R_{2к})$, что затрудняет внедрение способа на предприятиях и его реализацию аппаратными средствами.

Преобразовав (3) с учётом (1) и (2), получим

$$R_{2\hat{e}} = f_1(X_{2\hat{e}}) = \sqrt{\left(\frac{U_{\hat{n}}}{I_2 \cdot \hat{E}_{\hat{o}}} \cdot k_1\right)^2 - \tilde{O}_{2\hat{e}}^2} . \quad (2.4)$$

Анализ уравнения (4) показывает, что значения активной $R_{2к}$ и индуктивной $X_{2к}$ составляющих полного сопротивления, при которых для заданного значения угла открытия тиристоров α во вторичном контуре будет развиваться ток, равный I_2 , определяются величиной $\frac{I_2 \cdot \hat{E}_{\hat{o}}}{U_{\hat{n}}}$, которая при неизменных значениях $R_{2к}$ и $X_{2к}$ будет одинакова для всех ступеней сварочного трансформатора и значений сетевого напряжения на конкретной сварочной машине (рис. 2.1).

Функция (4) может быть аппроксимирована линейным выражением вида

$$\begin{array}{l} R_{2\hat{e}} = a_1 \cdot X_{2\hat{e}} + a_0 \\ R_{2\hat{e}} = b_1 \cdot X_{2\hat{e}} + b_0 \end{array} , \quad (2.5)$$

где a_1 и b_1 – линейные коэффициенты, которые задают для первого и второго включения соответственно в зависимости от выбранного в каждом случае угла α открытия тиристоров.

a_0 и b_0 – свободные члены, которые задают для первого и второго включения соответственно в зависимости от выбранного угла α открытия тиристоров.

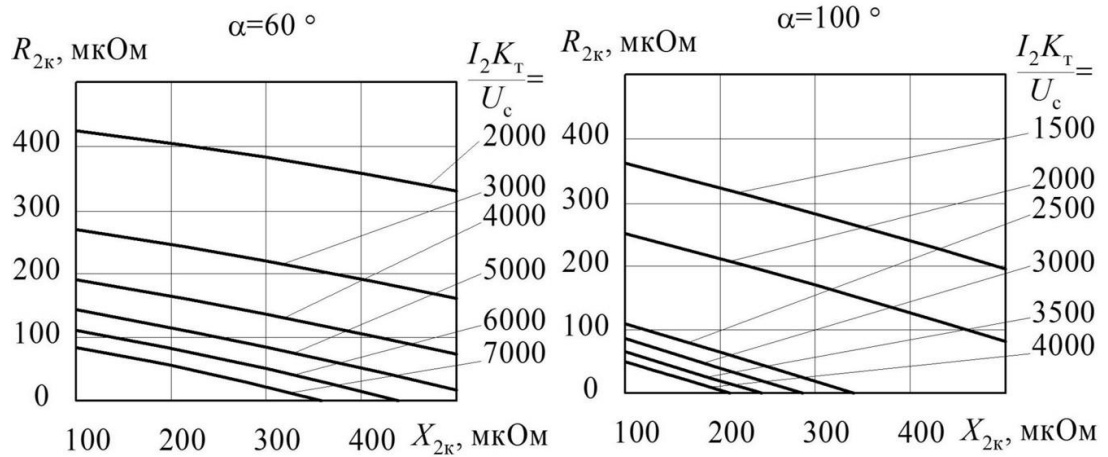


Рисунок 2.1 – Результаты построения численными методами зависимости $R_{2к}$ от $X_{2к}$ для заданных значений $\frac{I_2 \cdot \hat{E}_\delta}{U_{\bar{n}}}$ при $\alpha=60^\circ$ и $\alpha=100^\circ$

Линейные коэффициенты a_1 и b_1 в выражении (2.5) выбирают в зависимости от угла открытия тиристоров α , которая может быть аппроксимирована с погрешностью, не превышающей 1%, как

$$\begin{aligned} a_1 &= -0,352\alpha_1^2 + 0,584\alpha_1 - 0,803 \\ b_1 &= -0,352\alpha_2^2 + 0,584\alpha_2 - 0,803 \end{aligned} \quad (2.6)$$

где α_1 и α_2 – углы открытия тиристоров при первом и втором включении соответственно, рад.

Свободные члены a_0 и b_0 в выражении (2.5) выбирают в зависимости от угла открытия тиристоров α и величины $\frac{I_2 \cdot \hat{E}_\delta}{U_{\bar{n}}}$, эта зависимость может быть аппроксимирована с погрешностью, не превышающей 2 %, как

$$\begin{aligned} a_0 &= (6,465\alpha_1^2 - 37,682) \cdot \left(\frac{U_c}{I_2' \cdot K_\delta}\right)^2 + (-0,152\alpha_1^2 + 1,144) \cdot \frac{U_c}{I_2' \cdot K_\delta} \\ b_0 &= (6,465\alpha_2^2 - 37,682) \cdot \left(\frac{U_c}{I_2'' \cdot K_\delta}\right)^2 + (-0,152\alpha_2^2 + 1,144) \cdot \frac{U_c}{I_2'' \cdot K_\delta} \end{aligned} \quad (2.7)$$

где I'_2 и I''_2 – ток во вторичном контуре при первом и втором включении соответственно, А.

Производили включение в режиме короткого замыкания контактной сварочной машины МТПУ-300 при напряжении сети $U_c=360$ В, коэффициенте трансформации $K_T=140$ (I ступень сварочного трансформатора) и углах открытия тиристорov $\alpha_1=60^\circ$ и $\alpha_2=100^\circ$. С использованием измерителя контактной сварки МИКС-2М были измерены действующие значения вторичного тока в сварочном контуре, которые оказались равными 9200 А и 5100 А для каждого угла соответственно.

Вычисления в соответствии с (2.7) позволили получить $a_0=271 \cdot 10^{-6}$ и $b_0=339 \cdot 10^{-6}$, вычисления в соответствии с (2.6) позволили получить $a_1=-0,577$ и $b_1=-0,856$. Решение системы уравнений (2.5) для полученных значений a_0 , a_1 , b_0 и b_1 позволило получить искомые значения полного сопротивления: активная составляющая $R_{2к}=130 \cdot 10^{-6}$ Ом, индуктивная составляющая $X_{2к}=244 \cdot 10^{-6}$ Ом.

2.2 Моделирование фазового управления на контактных машинах

В настоящее время широкое применяется управление контактной сваркой со стабилизацией тока во вторичном контуре, позволяющая задавать действующее значение тока I_2 и его поддержание в условиях действия возмущений в течение заданного времени $t_{св}$. Такие электрические характеристики сварочной машины как индуктивное сопротивление вторичного контура $X_{2к}$, активное сопротивление вторичного контура $R_{2к}$ и напряжение заданной ступени трансформатора U_{20} оказывают значительное влияние на форму сварочного тока. Поэтому осциллограмма вторичного тока при заданном его значении I_2 будет существенно изменяться в зависимости от выбора контактной сварочной машины, настройки на режимы сварки (вылет электродов, ступень трансформатора и т.д.) и действующих возмущений [28, 29]. Оптимально подобрать сварочную машину и её

исходные настройки с учётом кривой сварочного тока можно при помощи осциллографирования тока [30], однако это весьма сложно и дорогостояще. Поэтому предлагается использовать построение теоретических осциллограмм на компьютере с применением стандартных математических пакетов, наполнение которых полностью соответствует современным нуждам исследователя-сварщика [21].

Моделирование процесса проводили с использованием системы MathCAD, которая предоставляет необходимые инструменты вычислений и средства визуализации их результата.

Исходными данными для расчёта являются: $R_{2к}$ – активное сопротивление вторичного контура, Ом; $R_{ээ}$ – сопротивление участка «электрод-электрод» при зажатых деталях, Ом; $X_{2к}$ – индуктивное сопротивление вторичного контура, Ом; K_n – коэффициент трансформации на n-ой ступени; α - угол включения тиристоров, °эл.

При расчётах используются следующие упрощения: пренебрегаем падением напряжения на тиристорах контактора, а потери в трансформаторе приводим к нагрузке во вторичном контуре, сварочное сопротивление $R_{ээ}$ принимаем независимым от времени сварки. Сварочная машина упрощённо представляется цепью последовательно включенных активного и индуктивного сопротивлений, подключенных к синусоидальному напряжению питающей сети через два встречно-параллельных тиристора.

После ввода исходных значений программа производит задание функций и вычисления, которые отображаются на двумерной диаграмме (рис. 2.2). Для упрощения математических выкладок за начало отсчёта времени $t=0$ принимаем момент включения тиристоров контактора. Тогда сетевое напряжение будет задаваться как:

$$u_c = U_m \sin(\omega t + \alpha), \quad (2.8)$$

где α – угол открытия тиристоров; U_m – амплитудное значение напряжения сети.

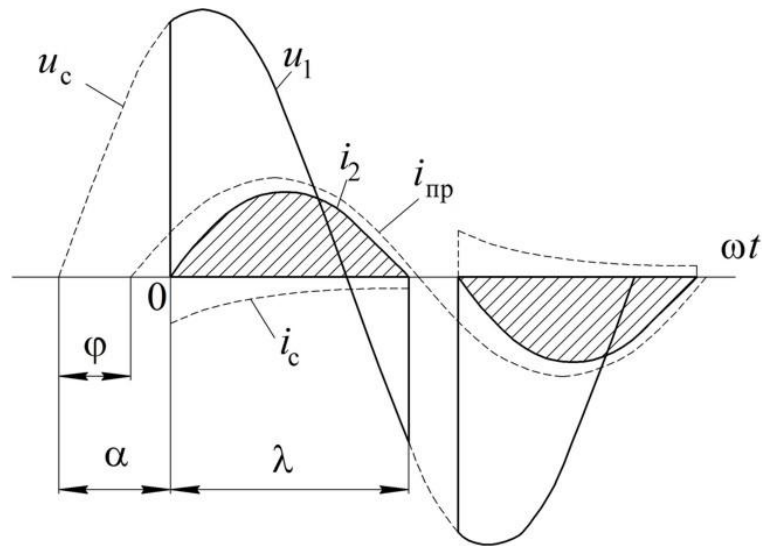


Рисунок 2.2 – Диаграммы мгновенных значений напряжения питающей сети u_c , напряжения на первичной обмотке сварочного трансформатора u_1 , вторичного тока i_2 и его составляющих: полнофазного тока $i_п$ и свободного тока i_c

Напряжение, подаваемое на первичную обмотку сварочного трансформатора, в таком случае задаётся как:

$$u_1 = \begin{cases} u_c \text{ при открытом тиристоре} \\ 0 \text{ при закрытом тиристоре} \end{cases} . \quad (2.9)$$

Коэффициент мощности сварочной машины в режиме сварки может быть вычислен как:

$$\cos \varphi = \frac{R_{2к} + R_{эз}}{\sqrt{(R_{2к} + R_{эз})^2 + X_{2к}^2}} ; \quad (2.10)$$

При этом ток i_2 во вторичном контуре в каждом полупериоде определяется как сумма принуждённого $i_п$ свободного i_c токов:

$$i_2 = i_п + i_c , \quad (2.11)$$

где $i_п$ – ток, установившийся во вторичном контуре при отсутствии фазового регулирования:

$$i_п = I_{2\max} \cdot \sin(\omega t - \varphi) ; \quad (2.12)$$

i_c – свободный ток во вторичном контуре, возникающий вследствие переходного процесса при включении:

$$i_c = I_{2\max} \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot \exp(\omega t \cdot \operatorname{ctg}(\varphi)); \quad (2.13)$$

$I_{2\max}$ – амплитуда установившегося тока во вторичном контуре при полнофазном включении:

$$I_{2\max} = 380 / (K_n \cdot \sqrt{(R_{2к} + R_{ээ})^2 + X_{2к}^2}). \quad (2.14)$$

Действующие значения вторичного и полнофазного токов определяются интегралами:

$$I_{\pi} = \sqrt{2 \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\lambda}{\omega}} i_{\text{пр}}^2(t) dt} \quad \text{и} \quad I_2 = \sqrt{2 \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\lambda}{\omega}} i_2^2(t) dt}. \quad (8)$$

Использование предложенной программы позволяет: визуализировать работу регуляторов контактной сварки; определять устанавливаемый угол включения тиристоров при заданном действующем значении вторичного тока I_2 (особенно полезно при использовании устаревших регуляторов контактной сварки без функции регулирования сварочного тока); подбирать настройки сварочной машины (вылет электродов, ступень трансформатора и т.д.) для достижения оптимальной формы сварочного тока; максимально использовать установленную мощность сварочной машины для повышения степени жёсткости режима и производительности сварки.

2.3 Измерения на конкретной сварочной машине

Определение коэффициента трансформации

Исследования производили на контактной сварочной машине МТ-1931 (рис. 2.3). Для рассматриваемой сварочной машины отсутствовала информация о величине вторичного напряжения холостого хода U_{20} (коэффициента трансформации на рабочей ступни трансформатора K_T), поэтому принято решение определить его значение экспериментально с применением опыта холостого хода.

Сварочную машину и аппаратуру управления отключили от питающей сети. Далее со стороны первичной обмотки трансформатора зашунтировали тиристорный контактор посредством электрического проводника, что позволит получить режим однофазного включения. Собрали измерительный комплекс согласно схеме (рис. 2.4), позволяющей получить значение сетевого напряжения U_c и напряжения на вторичной витке U_{20} .



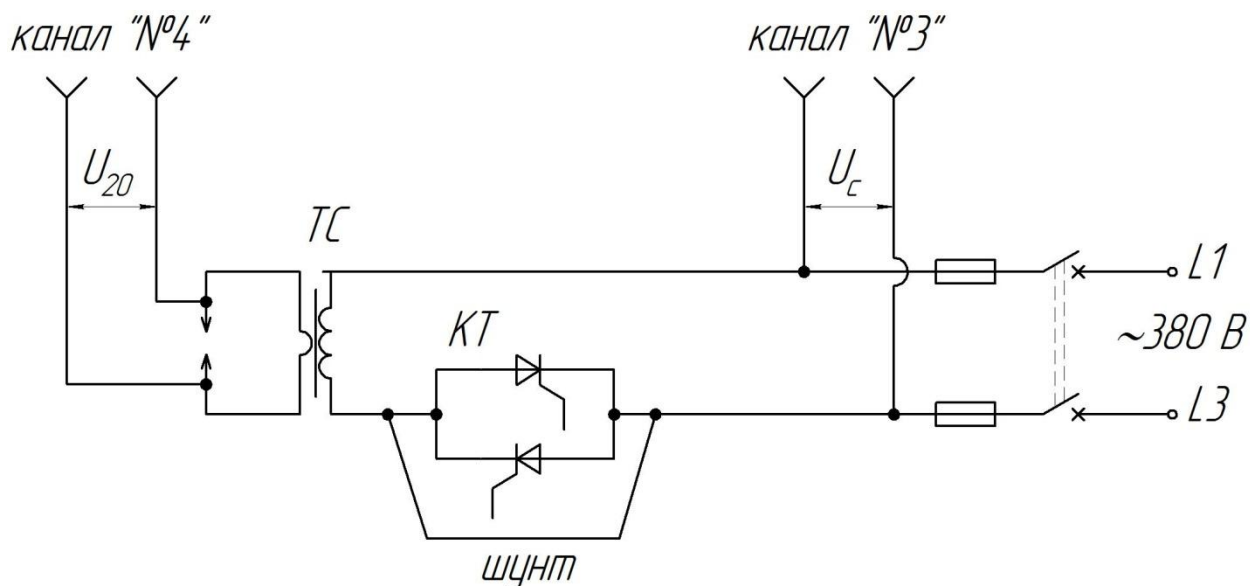
Рисунок 2.3 – Машина контактной сварки МТ-1928

Производили подключение контактной машины к питающей сети и осциллографирование напряжения со стороны первичной и вторичной цепей сварочной машины.

По результатам измерения величины сетевого напряжения U_c и вторичного напряжения U_{20} (табл. 2.1) вычисляли коэффициент трансформации:

$$K_T = \frac{U_c}{U_{20}}. \quad (2.8)$$

Принято значение коэффициента трансформации, равное $K_T=70$.



ТС – сварочный трансформатор; КТ – тиристорный контактор

Рисунок 2.4 – Схема измерений при проведении опыта холостого хода

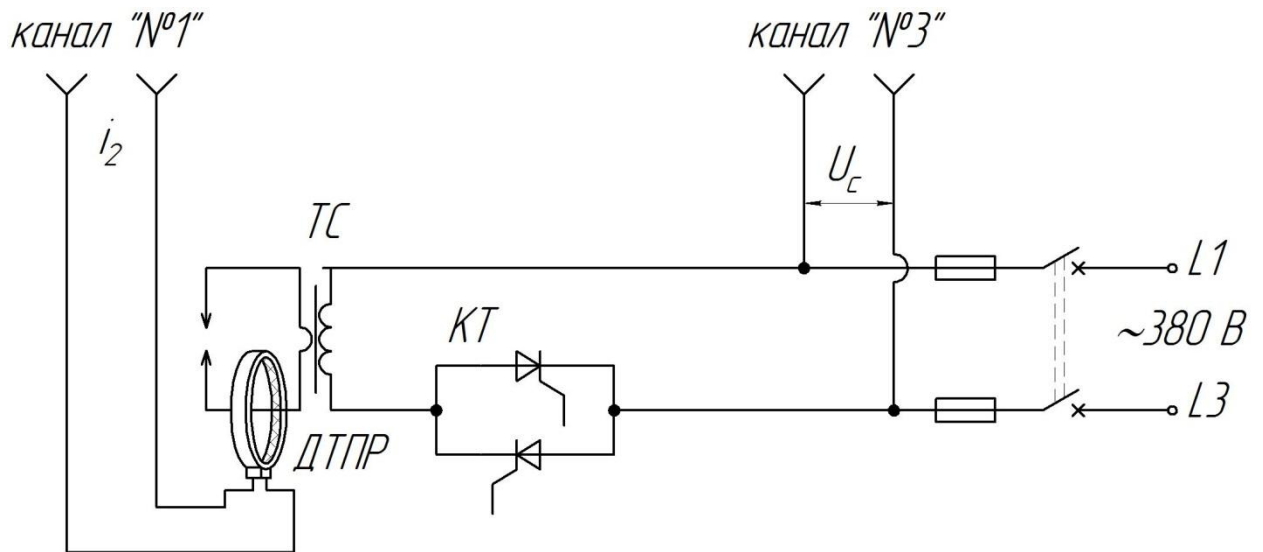
Таблица 2.1 – Результаты измерения в ходе опыта холостого хода

| Номер измерения | Сетевое напряжение U_c , В | Напряжение на вторичном витке U_{20} , В | Коэффициент трансформации K_T |
|-----------------|------------------------------|--|---------------------------------|
| 1 | 414 | 5,91 | 70 |
| 2 | 410 | 5,86 | 70 |
| 3 | 417 | 5,96 | 70 |
| 4 | 412 | 5,88 | 70 |

Исследование и анализ работы машины

в режиме короткого замыкания

Производили включение контактной сварочной машины в режиме короткого замыкания на рабочей ступени трансформатора ($K_T=70$). Между сварочными электродами устанавливали медную пластину толщиной 10 мм. Контролировали следующие параметры: сетевое напряжение U_c , ток I_2 во вторичном контуре (табл. 2.2, рис. 2.5).



ТС – сварочный трансформатор; КТ – тиристорный контактор; ДТПР – датчик тока «пояс Роговского»

Рисунок 2.5 - Схема получения осциллограмм вторичного тока и сетевого напряжения на контактной машине при проведении опыта короткого замыкания

На полученных осциллограммах тока и напряжения измеряли угол открытия тиристоров α и длительность λ их включенного состояния (рис. 2.6, табл. 2.2).

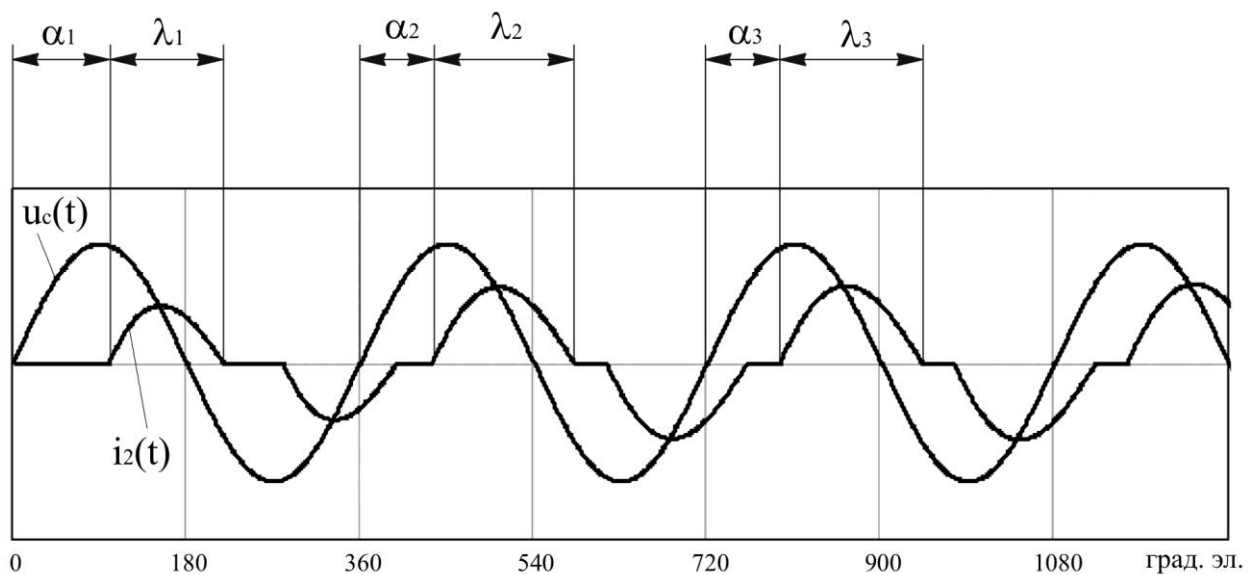


Рисунок 2.6 - Определение угла α включения сварочных тиристоров и длительности λ их включения по осциллограммам тока и напряжения

Таблица 2.2 – Результаты измерений в режиме короткого замыкания

| № периода | Сетевое напряжение U_c , В | Угол открытия тиристорov α , эл. град | Измеренная длительность включенного состояния тиристорov λ , эл. град | Измеренный вторичный ток I_2 , А |
|-----------|------------------------------|--|---|------------------------------------|
| 1.1 | 388 | 99,3 | 134,5 | 8800 |
| 1.2 | 388 | 80,5 | 161,5 | 12600 |
| 1.3 | 388 | 80,5 | 162,0 | 12700 |
| 2.1 | 383 | 99,9 | 134,5 | 8900 |
| 2.2 | 383 | 68,6 | 177 | 14750 |
| 2.3 | 383 | 67,0 | 180 | 14900 |

Производили вычисление параметров электрических процессов в режиме короткого замыкания (полного $Z_{2к}$, активного $R_{2к}$ и индуктивного $X_{2к}$ сопротивлений машины со стороны вторичного контура в режиме короткого замыкания). Для каждой пары значений α и λ определяли величину коэффициента мощности в режиме короткого замыкания $\cos \varphi_k$ путём решения уравнения:

$$\sin(\lambda + \alpha - \varphi) / \sin(\alpha - \varphi) = \exp(-\lambda \operatorname{ctg} \varphi). \quad (2.9)$$

Результаты решения уравнения (2.9) для каждой пары значений α и λ занесли в таблицу 2.3. Далее для каждой пары значений α и λ определяли величину коэффициента регулирования тока, решая уравнение:

$$k_i = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} - \frac{\sin \lambda}{\pi \cos \varphi} \cos(2\alpha + \varphi + \lambda)}, \quad (2.10)$$

где α и λ - в радианах.

Результаты решения уравнения (2.10) занесли в таблицу 2.3.

Далее вычисляли полное сопротивление контактной машины в режиме короткого замыкания $Z_{2к}$:

$$Z_{2к} = \frac{U_c / K_T}{I_{2к} / k_i}, \quad (2.11)$$

где $Z_{2г}$ – полное сопротивление контактной машины в режиме короткого замыкания;

U_c – сетевое напряжение;

K_T – коэффициент трансформации на данной ступени;

k_i – коэффициент регулирования тока;

$I_{2к}$ – измеренный вторичный ток в режиме короткого замыкания.

Результаты вычислений по формуле (2.11) для каждой пары значений α и λ занесли в таблицу 2.3.

Далее для каждой пары значений α и λ вычисляли величину активного $R_{2к}$ и индуктивного $X_{2к}$ сопротивлений машины в режиме короткого замыкания:

$$R_{2к} = Z_{2к} \cdot \cos \varphi_k, \quad (2.12)$$

$$X_{2к} = Z_{2к} \cdot \sin \varphi_k. \quad (2.13)$$

Таблица 2.3 – Результаты вычисления параметров в режиме короткого замыкания

| № | α , град | λ , град | $\cos \varphi_k$ | k_i | Измеренный вторичный ток $I_{2к}$, А | Полное сопр-е $Z_{2к}$, мкОм | Активное сопр-е $R_{2к}$, мкОм | Индуктивное сопр-е $X_{2к}$, мкОм |
|-----|--------------------|---------------------|------------------|-------|---|--|---------------------------------------|--|
| 1.1 | 99,3 | 134,5 | 0,429 | 0,574 | 8800 | 361 | 155 | 327 |
| 1.2 | 80,5 | 161,5 | 0,406 | 0,823 | 12600 | 362 | 147 | 331 |
| 1.3 | 80,5 | 162 | 0,398 | 0,827 | 12700 | 361 | 144 | 331 |
| 2.1 | 99,9 | 134,5 | 0,412 | 0,571 | 8900 | 351 | 145 | 320 |
| 2.2 | 68,6 | 177 | 0,403 | 0,972 | 14750 | 361 | 145 | 330 |
| 2.3 | 67,0 | 179 | 0,404 | 0,991 | 14900 | 364 | 147 | 333 |

На основании анализа осциллограмм тока и напряжения при включении машины в режиме короткого замыкания и на основании проведённых вычислений для последующих расчётов примем $R_{2к}=145$ мкОм, $X_{2к}=330$ мкОм.

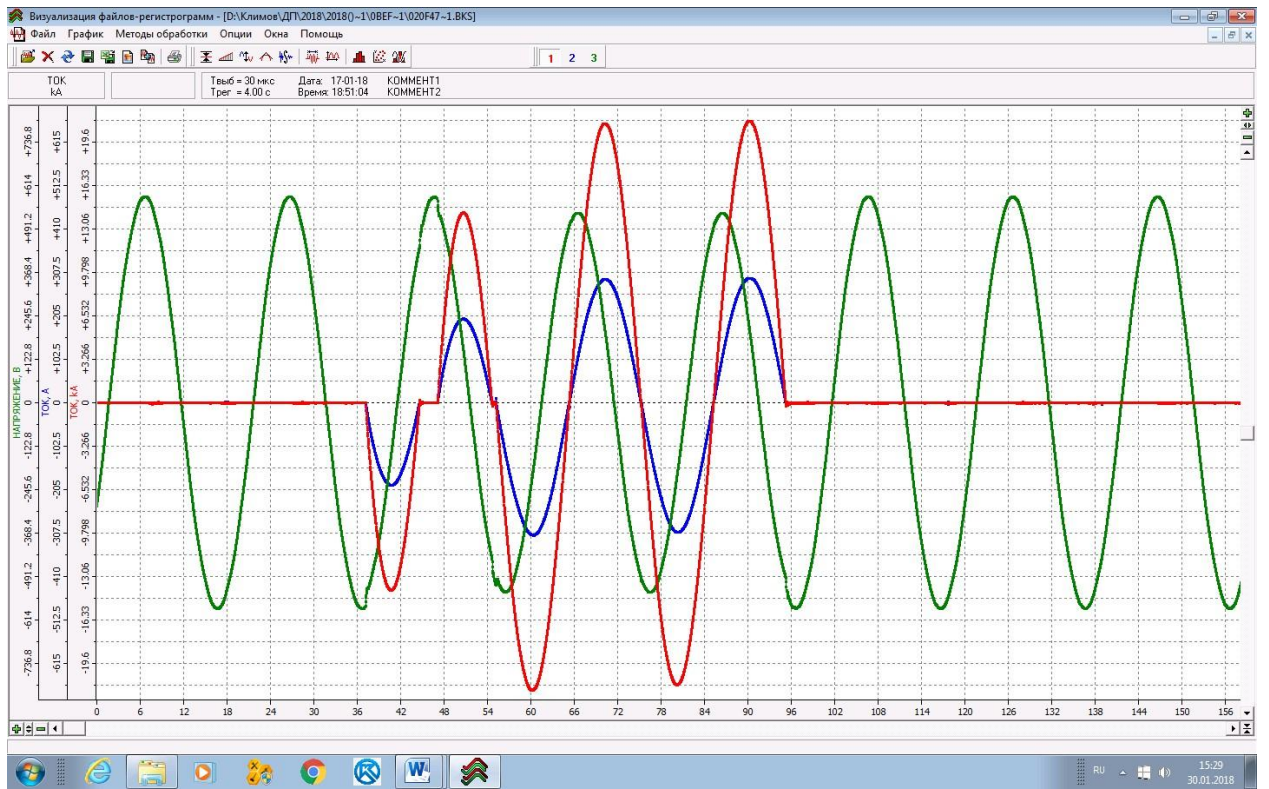
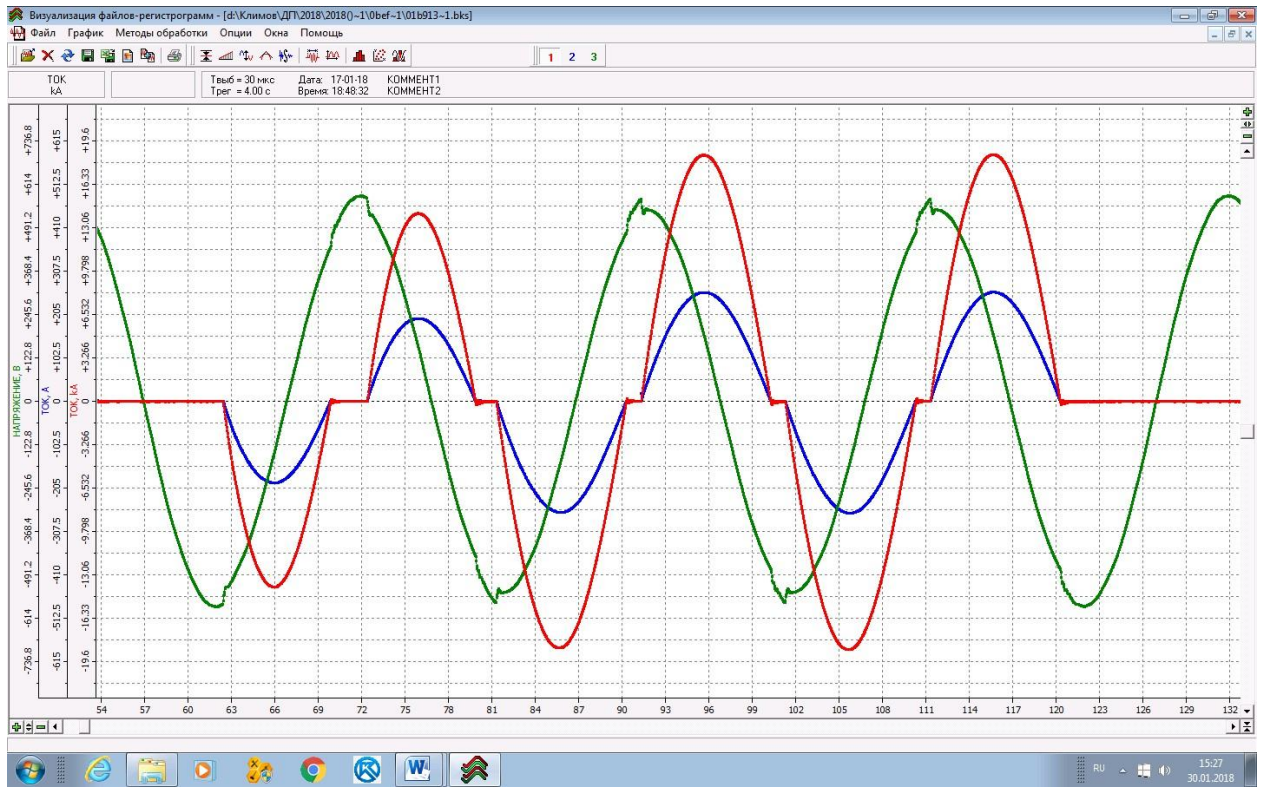


Рисунок 2.7 – Осциллограммы тока и напряжения при включении контактной машины в режиме короткого замыкания

Анализ работы машины в режиме сварки

Производили включение контактной машины в режиме сварки. В процессе сварки получали осциллограммы сетевого напряжения u_c и тока во вторичном контуре i_2 . На полученных осциллограммах тока и напряжения измеряли угол открытия тиристорov α и длительность λ их включенного состояния (рис. 2.8, табл. 2.4).

По формулам (2.9) и (2.10) для каждой пары значений α и λ вычисляли значение коэффициента мощности $\cos \varphi$ и коэффициента регулирования тока k_i в режиме сварки. Результаты вычисления занесли в табл. 2.4. Далее для каждого периода сварки вычисляли расчётный вторичный ток с использованием формулы:

$$I_{2\text{расч}} = \frac{U_c \cdot \sin \varphi}{X_{2к} \cdot K_T} \cdot k_i . \quad (2.14)$$

Результаты вычисления $I_{2\text{расч}}$ для каждого периода сварочного тока занесли в табл. 2.4 и сравнивали его с измеренным значением I_2 . По результатам сравнения величины I_2 и $I_{2\text{расч}}$ для каждого периода можно сделать вывод о достаточно низкой погрешности метода, которая с учётом погрешности задания величин активного $R_{2к}$ и индуктивного $X_{2к}$ сопротивлений контактной машины не превышает 5 %.

Оценку изменения величины сварочного сопротивления $R_{\text{эв}}$ проводили с использованием формулы:

$$R_{\text{эв}} = \frac{U_c \cdot k_i}{I_2 \cdot K_T} \cdot \cos \varphi - R_{2к} . \quad (2.15)$$

Результаты вычисления величины $R_{\text{эв}}$ занесли в таблицу 2.4.

Оценку тепловыделения $q_{\text{эв}}$ на участке «электрод-электрод» производили с использованием формулы

$$q_{\text{эв}} = I_2^2 \cdot R_{\text{эв}} \cdot 0,02 \quad (2.16)$$

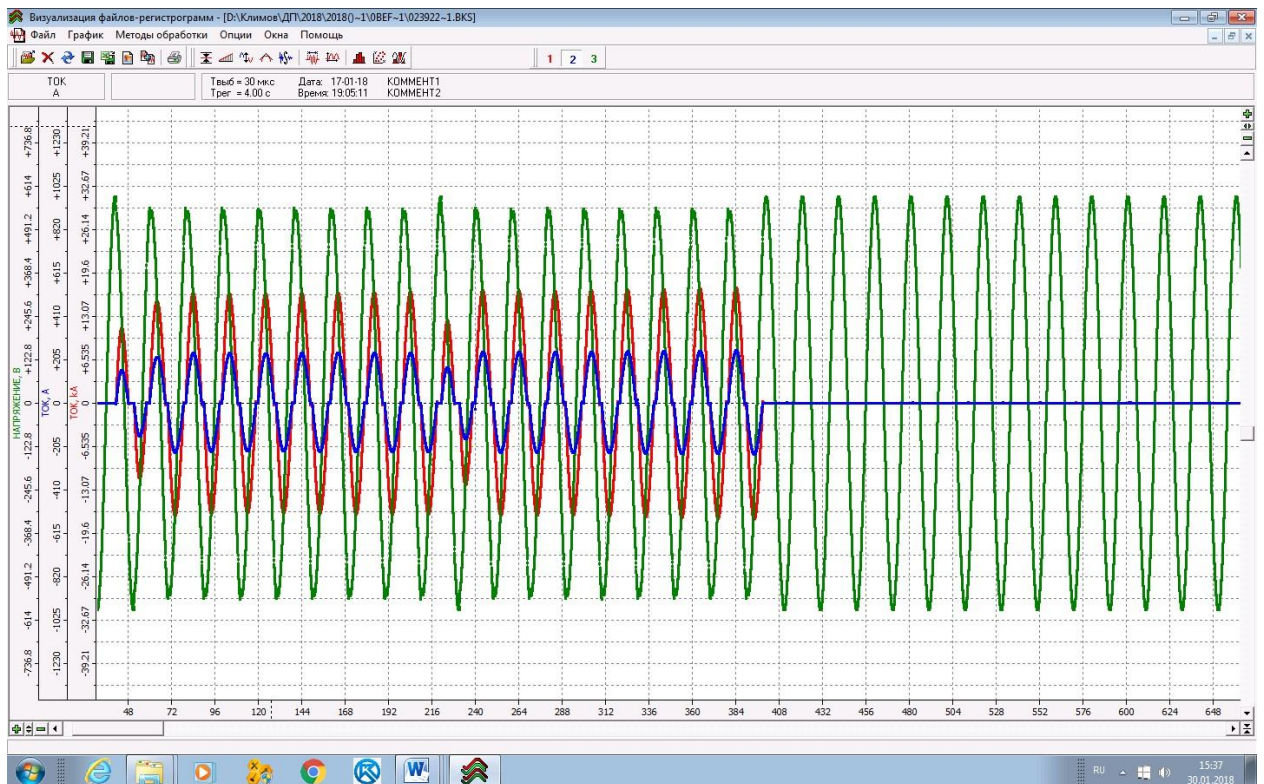
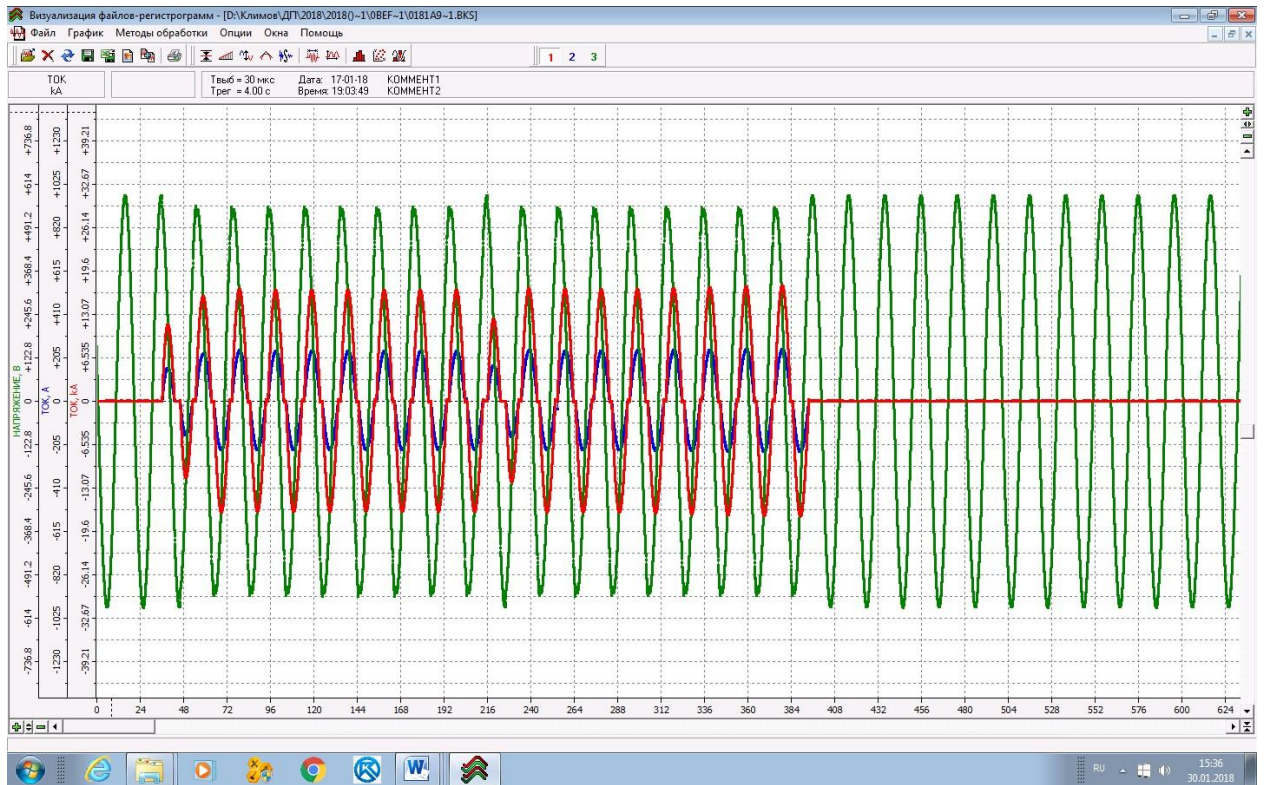


Рисунок 2.8 - Осциллограммы тока и напряжения при включении контактной машины в режиме сварки

Таблица 2.4 – Вычисление сварочного сопротивления $R_{св}$ и тока во вторичном контуре $I_{2расч}$ в режиме сварки (первая сварка) ($U_c=389$ В)

| № периода | α , град | λ , град | $\cos \varphi$ | k_i | Измеренный вторичный ток I_2 , А | Расчётный вторичный ток $I_{2расч}$, А | Сварочное сопротивление $R_{св}$, мкОм |
|-----------|-----------------|------------------|----------------|-------|------------------------------------|---|---|
| 1 | 98.3 | 123.1 | 0.673 | 0.54 | 6850 | 6719 | 155 |
| 2 | 72.4 | 157.1 | 0.618 | 0.821 | 10910 | 1086 | 115 |
| 3 | 72.4 | 159.3 | 0.587 | 0.832 | 11200 | 11350 | 94 |
| 4 | 72.4 | 158.8 | 0.594 | 0.83 | 11180 | 11240 | 99 |
| 5 | 72.4 | 159.3 | 0.587 | 0.832 | 11170 | 11350 | 94 |
| 6 | 72.4 | 158.8 | 0.594 | 0.83 | 11130 | 11240 | 99 |
| 7 | 72.4 | 159.3 | 0.587 | 0.832 | 11150 | 11350 | 94 |
| 8 | 72.4 | 158.8 | 0.594 | 0.83 | 11160 | 11240 | 99 |
| 9 | 72.4 | 159.3 | 0.587 | 0.832 | 11180 | 11350 | 94 |
| 10 | 98.2 | 127.4 | 0.597 | 0.55 | 7430 | 7437 | 100 |
| 11 | 72.4 | 158.8 | 0.594 | 0.83 | 11320 | 11240 | 98 |
| 12 | 72.4 | 159.8 | 0.58 | 0.835 | 11270 | 11460 | 90 |
| 13 | 72.4 | 159.8 | 0.58 | 0.835 | 11310 | 11460 | 90 |
| 14 | 72.4 | 159.8 | 0.58 | 0.835 | 11360 | 11460 | 90 |
| 15 | 72.4 | 160.9 | 0.564 | 0.842 | 11460 | 11710 | 80 |
| 16 | 72.4 | 160.9 | 0.564 | 0.842 | 11580 | 11710 | 80 |
| 17 | 72.9 | 161.5 | 0.546 | 0.844 | 11680 | 11900 | 70 |
| 18 | 72.9 | 161.5 | 0.546 | 0.844 | 11750 | 11900 | 70 |

Таблица 2.5 – Вычисление сварочного сопротивления R_{Σ} и тока во вторичном контуре $I_{2\text{расч}}$ в режиме сварки (вторая сварка) ($U_c=386$ В)

| № периода | α , град | λ , град | $\cos \varphi$ | k_i | Измеренный вторичный ток I_2 , А | Расчётный вторичный ток $I_{2\text{расч}}$, А | Сварочное сопротивление R_{Σ} , мкОм |
|-----------|-----------------|------------------|----------------|-------|------------------------------------|--|---|
| 1 | 98.3 | 122.0 | 0.692 | 0.538 | 6700 | 6485 | 172 |
| 2 | 72.4 | 155.0 | 0.648 | 0.81 | 10820 | 10310 | 136 |
| 3 | 72.9 | 157.6 | 0.603 | 0.821 | 11060 | 10950 | 104 |
| 4 | 72.9 | 158.2 | 0.594 | 0.824 | 11030 | 11080 | 99 |
| 5 | 72.9 | 158.2 | 0.594 | 0.824 | 11030 | 11080 | 99 |
| 6 | 72.9 | 157.7 | 0.601 | 0.822 | 11090 | 10970 | 103 |
| 7 | 72.9 | 158.2 | 0.594 | 0.824 | 11180 | 11080 | 99 |
| 8 | 72.9 | 158.8 | 0.586 | 0.828 | 11210 | 11210 | 93 |
| 9 | 72.9 | 159.3 | 0.578 | 0.831 | 11220 | 11320 | 89 |
| 10 | 98.8 | 127.4 | 0.582 | 0.546 | 7480 | 74180 | 91 |
| 11 | 72.4 | 158.8 | 0.594 | 0.83 | 11370 | 11150 | 99 |
| 12 | 72.9 | 159.8 | 0.571 | 0.834 | 11360 | 11430 | 85 |
| 13 | 72.9 | 159.8 | 0.571 | 0.834 | 11400 | 11430 | 85 |
| 14 | 72.9 | 160.4 | 0.562 | 0.837 | 11470 | 11570 | 79 |
| 15 | 72.9 | 160.9 | 0.555 | 0.84 | 11600 | 11680 | 75 |
| 16 | 72.9 | 161.5 | 0.546 | 0.844 | 11640 | 11810 | 70 |
| 17 | 72.9 | 161.5 | 0.546 | 0.844 | 11700 | 11810 | 70 |
| 18 | 72.9 | 161.5 | 0.546 | 0.844 | 11820 | 11810 | 70 |

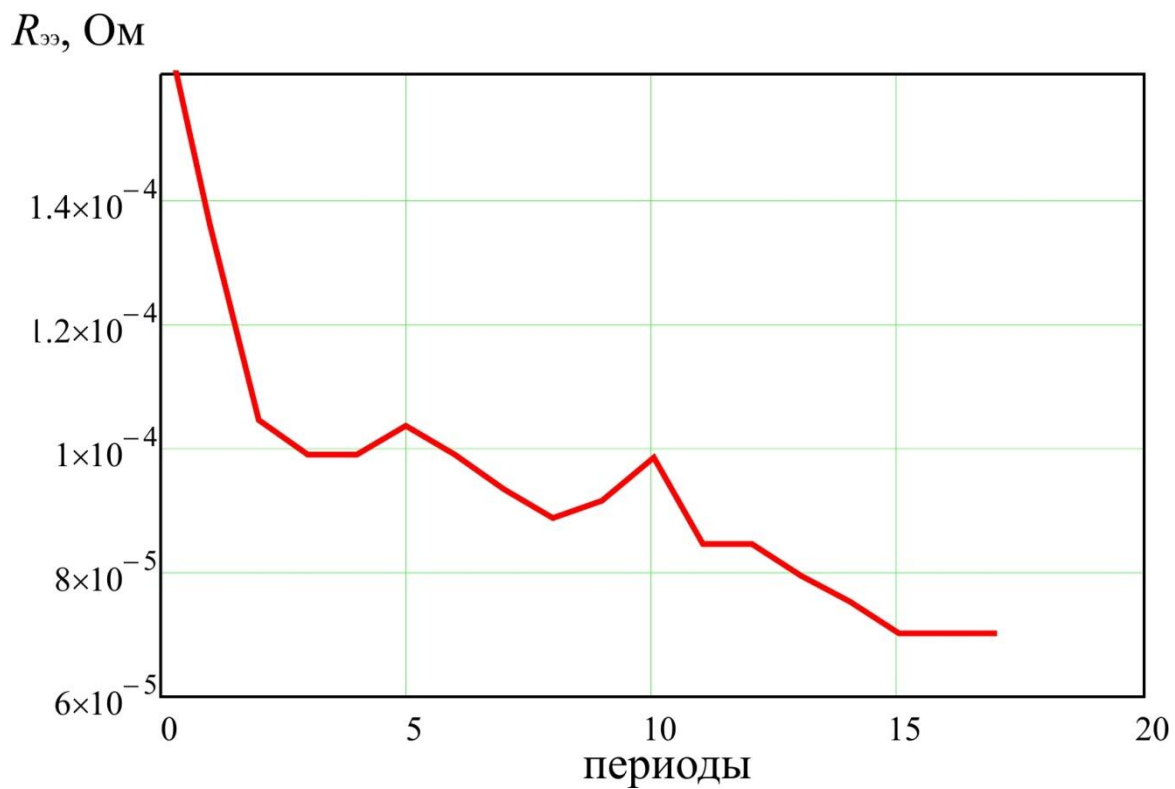
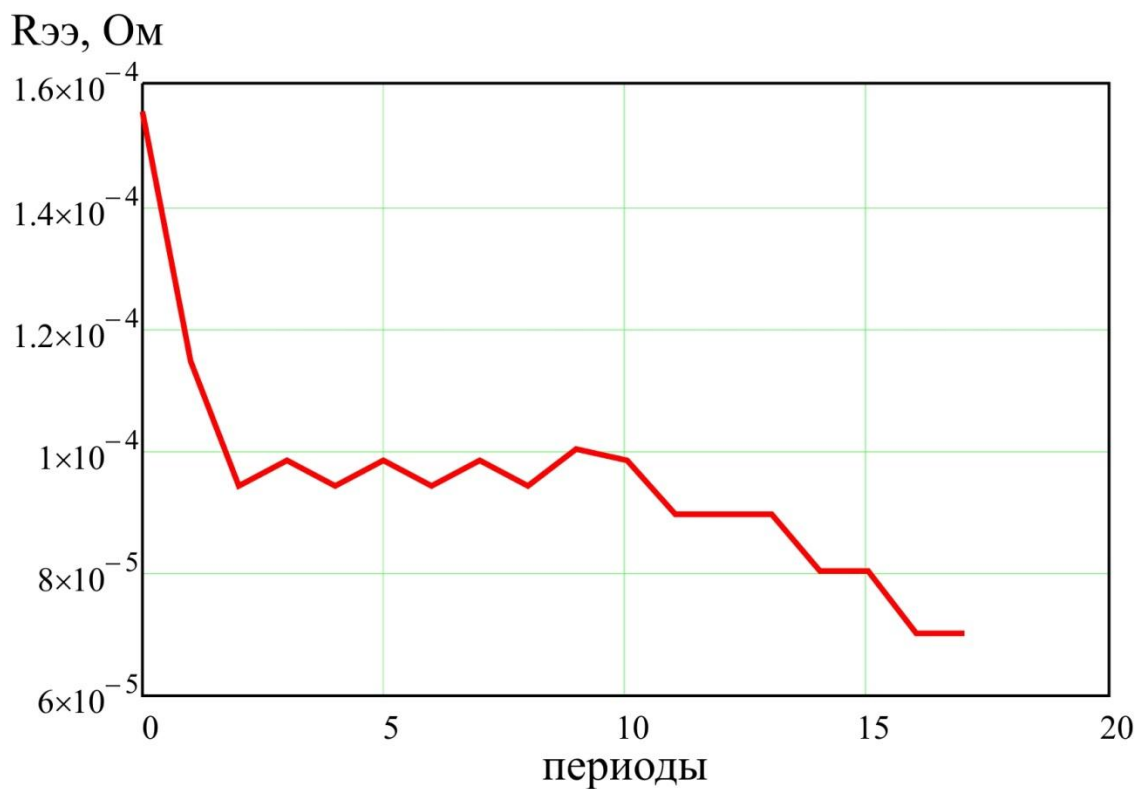


Рисунок 2.9 – Сопротивление $R_{ээ}$ участка «электрод-электрод» при сварке в первом и втором случае

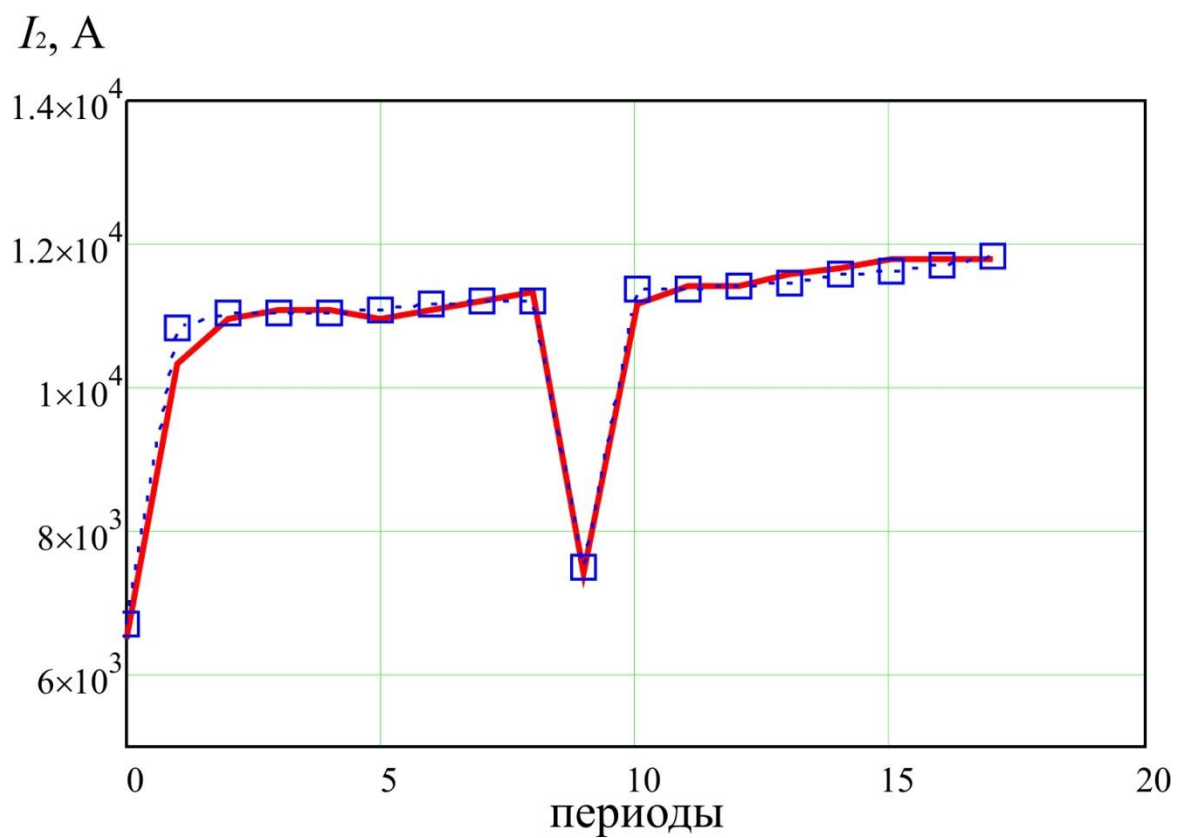
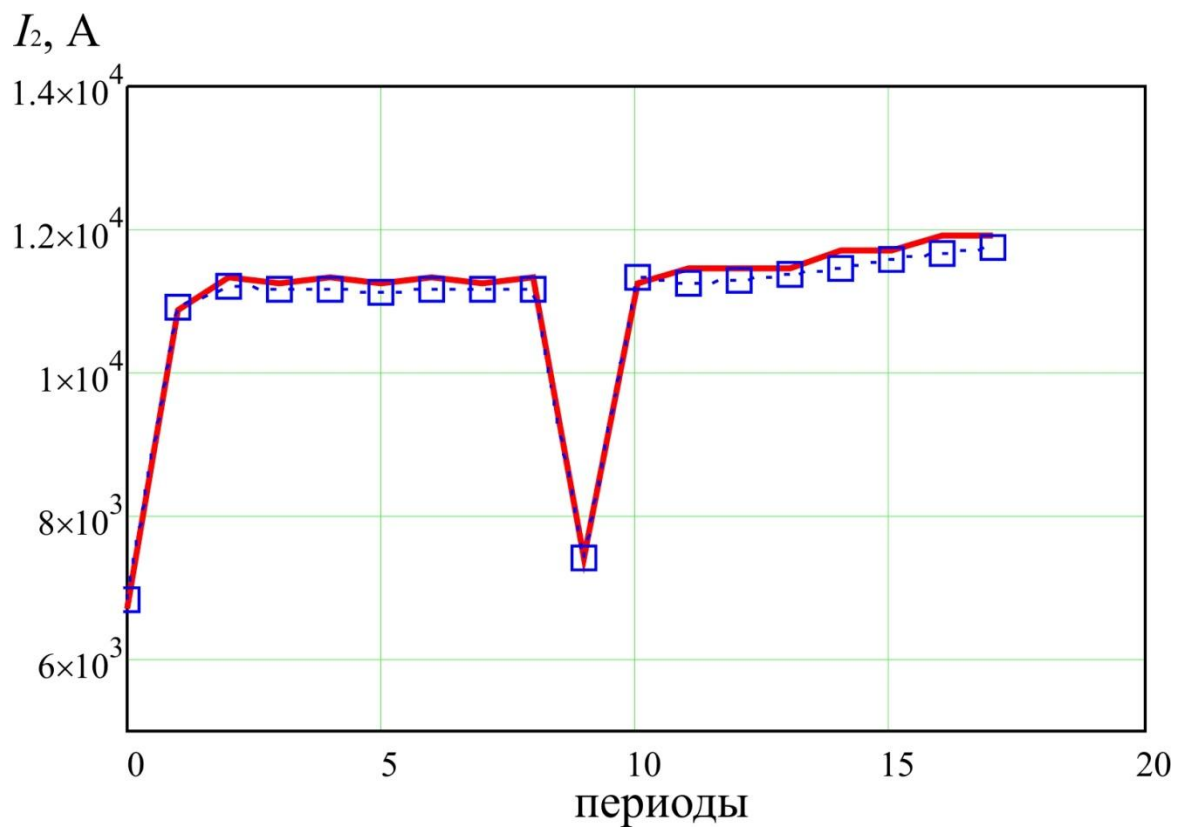


Рисунок 2.10 – Расчётное (—) и измеренное (□) значение вторичного тока I_2 при сварке в первом и во втором случае

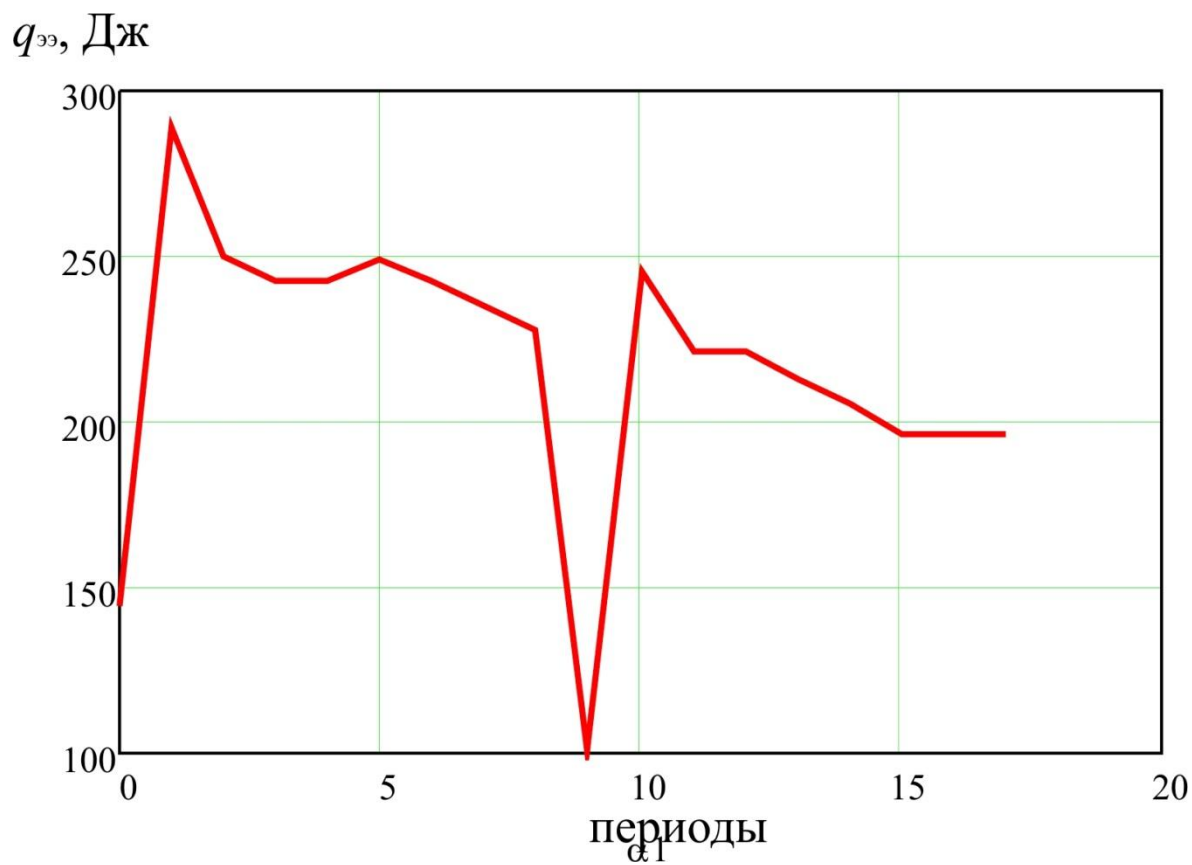


Рисунок 2.11 – Расчётное тепловыделение $q_{\text{эз}}$ на участке «электрод-электрод» при сварке в первом и во втором случае

Рекомендации по оптимизации параметров режима сварки

Для уменьшения вероятности конечного выплеска предложено уменьшить длительность импульса сварочного тока до 0,24 с, увеличив силу сварочного тока до 13 кА. Сварку производить одним импульсом длительностью 12 периодов (0,24 с). Для увеличения сварочного тока предложено уменьшить угол открытия тиристорov с 72 до 60 электрических градусов.

Таблица 2.6 – Вычисление сварочного сопротивления $R_{ээ}$ и тока во вторичном контуре $I_{2расч}$ в режиме сварки (рекомендованный режим) ($U_c=380$ В)

| № периода | α , град | λ , град | $\cos \varphi$ | k_i | Измеренный вторичный ток I_2 , А | Расчётный вторичный ток $I_{2расч}$, А | Сварочное сопротивление $R_{ээ}$, мкОм |
|-----------|-----------------|------------------|----------------|-------|------------------------------------|---|---|
| 1 | 100 | 121.0 | 0.674 | 0.522 | 6400 | 6339 | 156 |
| 2 | 60 | 170.1 | 0.631 | 0.929 | 11970 | 11850 | 124 |
| 3 | 60 | 171.9 | 0.607 | 0.94 | 12030 | 12280 | 107 |
| 4 | 60 | 174.3 | 0.575 | 0.956 | 13010 | 12870 | 87 |
| 5 | 60 | 175.2 | 0.563 | 0.963 | 13040 | 13090 | 80 |
| 6 | 60 | 176.2 | 0.55 | 0.97 | 13030 | 13330 | 72 |
| 7 | 60 | 175.7 | 0.556 | 0.966 | 13000 | 13210 | 76 |
| 8 | 60 | 175.1 | 0.564 | 0.962 | 13200 | 13060 | 80 |
| 9 | 60 | 175.3 | 0.562 | 0.963 | 13260 | 13110 | 79 |
| 10 | 60 | 175.4 | 0.56 | 0.964 | 13080 | 13130 | 78 |
| 11 | 60 | 174.3 | 0.575 | 0.956 | 13200 | 12870 | 87 |
| 12 | 60 | 174.2 | 0.576 | 0.956 | 13170 | 12850 | 88 |

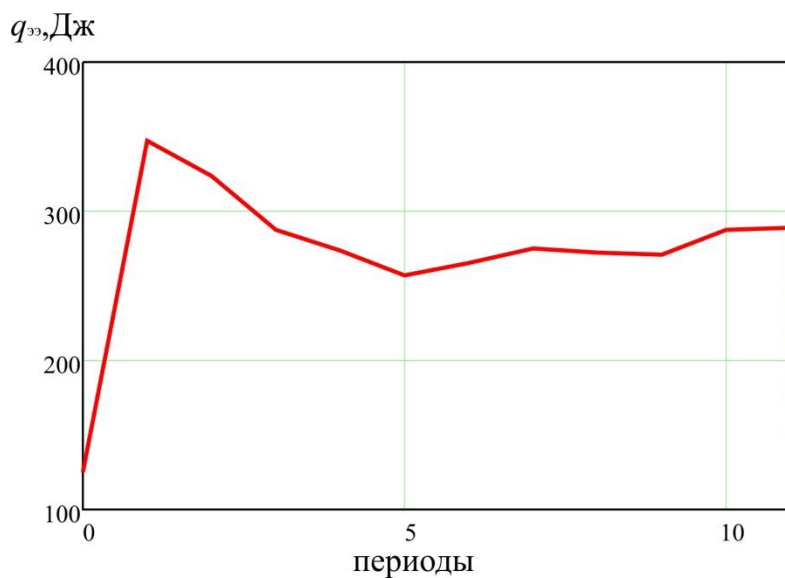
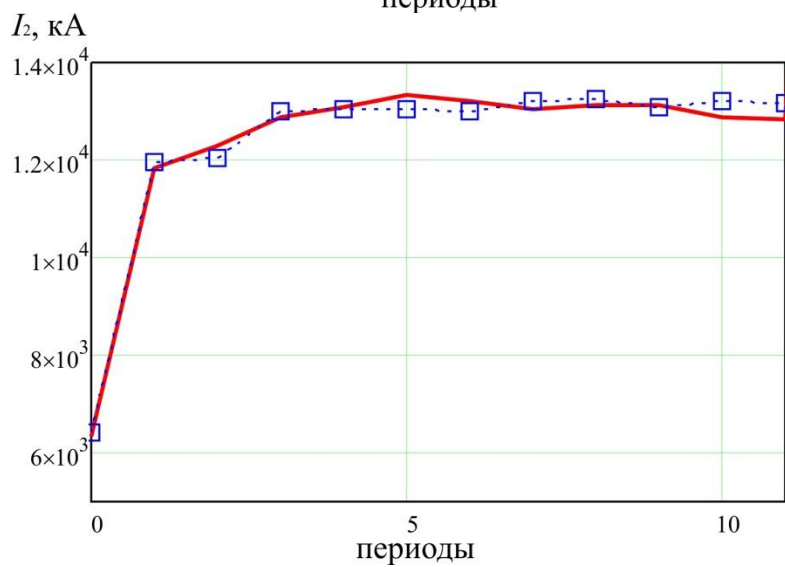
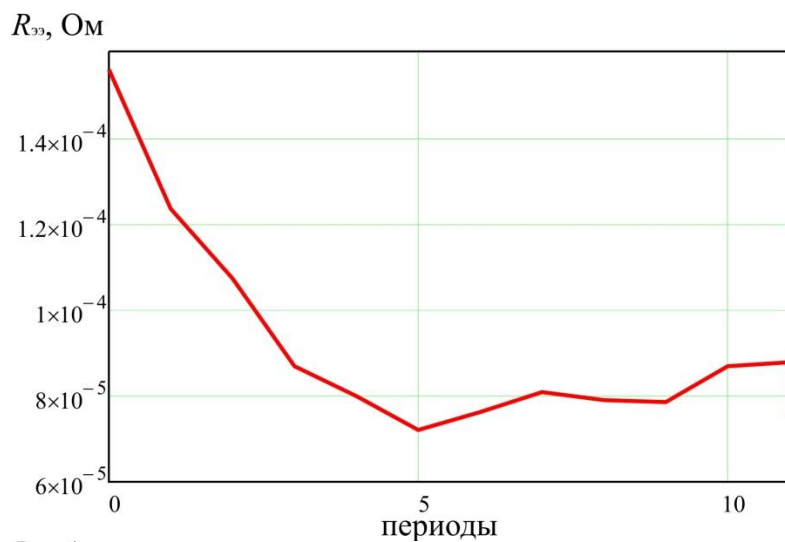


Рисунок 2.12 – Диаграммы изменения сопротивления $R_{эз}$, тока I_2 и тепловыделения $q_{эз}$ при сварке на рекомендованном режиме

3 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКОЙ

3.1 Моделирование электрических процессов при контактной сварке в условиях действия возмущений

Энергия, которая выделяется в зоне сварки, в общем случае, рассчитывается как:

$$W_{\text{св}} = \int_0^{t_{\text{св}}} u_{\text{к}}(t) \cdot i_2(t) dt, \quad (3.1)$$

где $u_{\text{к}}(t)$ – мгновенное напряжение на сварочном контакте (рис. 3.1, а), В;
 $i_2(t)$ – мгновенный сварочный ток, А.

Такое определение обуславливает необходимость измерения напряжения на сварочном контакте $u_{\text{к}}(t)$ (рис. 3.1), что является достаточно сложным, и сварочного тока, для чего обычно используется датчик на основе катушки Роговского, стоимость которого на порядок выше датчиков, которые можно установить в первичную цепь (например, трансформаторов тока).

Таким образом, возникает задача разработки способа стабилизации тепловыделения в сварочном контакте, позволяющего стабилизировать сварочный процесс, используя измерения только в первичной цепи сварочного трансформатора.

В соответствии с законом сохранения энергии, можно записать выражение для нахождения энергии, которая выделяется в зоне сварки:

$$W_{\text{св}} = W_{\text{м}} - \Delta W_1 - \Delta W_{\text{нам}} - \Delta W_2, \quad (3.2)$$

где $W_{\text{м}}$ – энергия, потребляемая трансформатором, Дж;

W_1 – потери энергии в первичной цепи трансформатора, Дж;

$\Delta W_{\text{нам}}$ – потери энергии в цепи намагничивания трансформатора (потери в стали), Дж;

ΔW_2 – энергия, выделяемая в сварочной цепи за исключением энергии, выделяемой в зоне контакта, Дж.

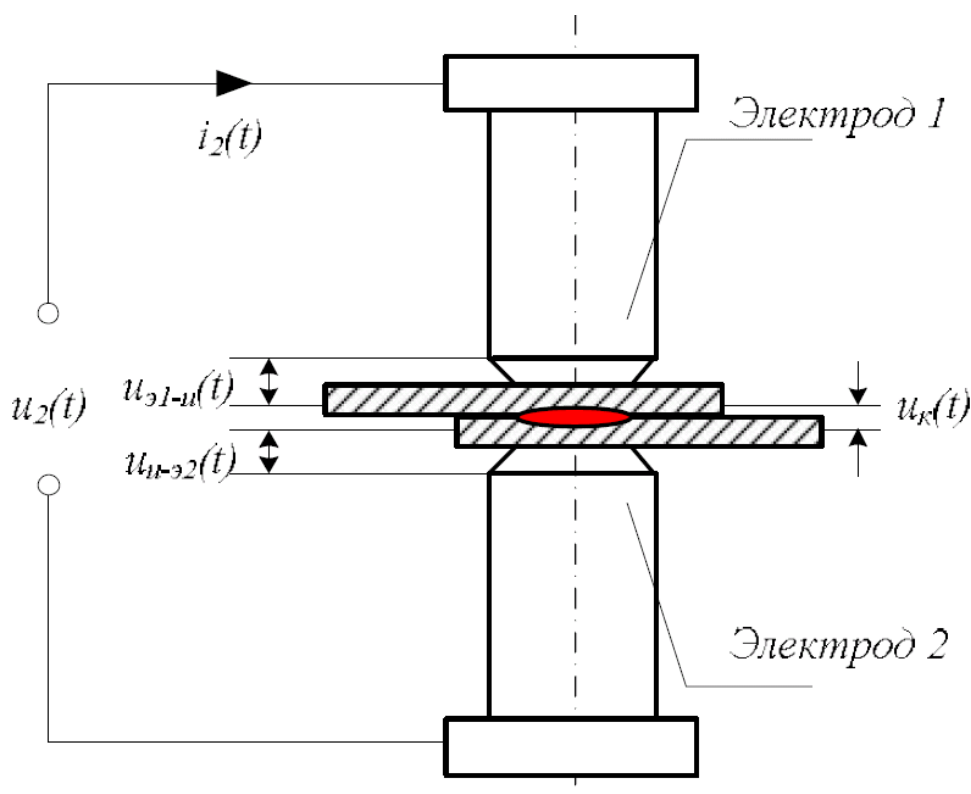


Рисунок 3.1 – Структурная схема сварочного контакта

Для расчета энергии, которая выделяется в зоне сварки, необходимо определять параметры трансформатора и сварочной цепи в режиме реального времени, поскольку они могут с течением времени изменяться в зависимости от многих факторов, например, от температуры сварочного контура, от влияния внесенных в сварочный контур ферромагнитных масс, от износа электродов, и т. д.

Принято допущение, в соответствии с которым суммарное сопротивление участков «электрод 1 – изделие» и «изделие – электрод 2» равно сопротивлению участка «электрод 1 – электрод 2», полученное при смыкании электродов без изделия (рис. 3.2). Данное допущение не противоречит описанному в [43] способу измерения сопротивления сварочного контакта.

На рис. 3.3 приведена схема замещения трансформатора, ко вторичной обмотке которого подключена сварочная цепь. Сопротивление первичной цепи представлено активной r_1 и реактивной x_1 составляющими. Сопротивление цепи намагничивания также представлено активной r_μ и

реактивной x_{μ} составляющими. Сопротивление вторичной цепи, приведенное к первичной обмотке, состоит из активной компоненты $r'_{2} = r'_{2T} + r'_{св}$ и включает в себя сопротивление вторичной обмотки трансформатора r'_{2T} и сопротивление сварочной цепи за исключением сопротивления изделия (в зоне контакта) $r'_{св}$; и реактивной компоненты x'_{2} . Сопротивление изделия (в зоне контакта) представлено приведенным к первичной обмотке сопротивлением $r'_{к}$.

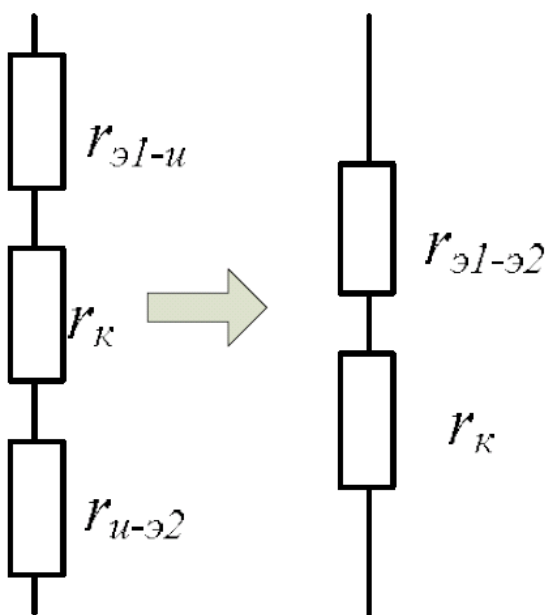


Рисунок 3.2 – Допущение о суммарном сопротивлении участка «электрод-электрод»

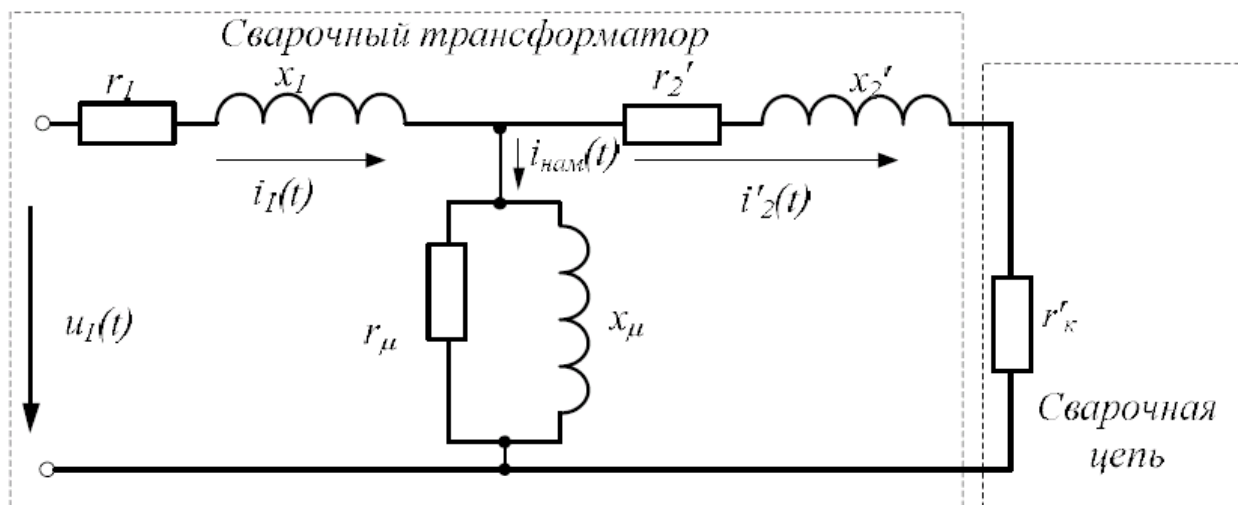


Рисунок 3.3 – Схема замещения сварочного трансформатора

Энергия, потребляемая трансформатором, может быть найдена по выражению:

$$W_M = \int_0^{t_{CB}} u_1(t) \cdot i_1(t) dt, \quad (3.3)$$

где $u_1(t)$ – мгновенное первичное напряжение трансформатора, В;

$i_1(t)$ – мгновенный ток первичной цепи трансформатора, А.

Потери энергии в первичной цепи трансформатора могут быть вычислены в соответствии со следующим выражением:

$$\Delta W_1 = \int_0^{t_{CB}} i_1^2(t) \cdot r_1 dt. \quad (3.4)$$

Потери энергии в цепи намагничивания трансформатора (потери в стали) рассчитываются с учетом падения напряжения на сопротивлении первичной цепи:

$$\Delta W_{\text{нам}} = \int_0^{t_{CB}} (u_1(t) - i_1(t) \cdot r_1) i_{\text{нам}}(t) dt, \quad (3.5)$$

где $i_{\text{нам}}(t)$ – ток намагничивания трансформатора, А.

Потери энергии во вторичной цепи трансформатора, включая потери в сварочном контуре (за исключением сопротивления изделия), можно найти как:

$$\Delta W_2 = \int_0^{t_{CB}} i_2'^2(t) \cdot (r_{2T}' + r_{CB}') dt, \quad (3.6)$$

где $i_2'(t) = i_1(t) - i_{\text{нам}}(t)$ – вторичный ток трансформатора (сварочный ток), приведенный к первичной обмотке;

$(r_{2T}' + r_{CB}')$ – суммарное сопротивление сварочной цепи (без сопротивления изделия), приведенное к первичной обмотке.

Видно, что для определения энергии, выделяемой в сварочном контакте, достаточно осуществлять измерения тока и напряжения в первичной цепи сварочного трансформатора. В процессе сварки активное сопротивление элементов сварочной цепи изменяется под влиянием

температуры. Это влияние можно учесть, осуществляя измерение температуры элементов сварочной цепи и коррекцию их сопротивления с учетом температурного коэффициента по выражению:

$$(r'_{2T} + r'_{св})_{\text{скор}} = (r'_{2T} + r'_{св}) \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)), \quad (3.7)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, для меди $4,3 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$;
 T_0 – начальная температура, при которой состоялось измерение активного сопротивления сварочной цепи, К;
 T – измеряемая температура, К.

На рис. 3.4 приведена блок-схема алгоритма, позволяющего обеспечить стабилизацию тепловыделения в сварочном контакте по величине заданной энергии. Контролируемыми сигналами являются ток и напряжение первичной цепи трансформатора и температура элементов сварочной цепи. Данный алгоритм реализован в блоке управления, и может быть интегрирован в системы управления источников питания машин контактной сварки, позволяющих формировать выходное напряжение с заданными параметрами, например, с тиристорным прерывателем в первичной цепи.

При подаче питания на контактную машину оператором устанавливаются параметры сварки, которые зависят от вида и толщины изделия: заданные энергию и максимальное время сварочного цикла. После этого оператор нажатием педали включает машину. Проверка нажатия педали осуществляется автоматически после каждого цикла сварки (после каждой точки).

Далее система автоматически переходит в режим подготовки к сварке. Если нажата кнопка «Настройка», система переходит в одноименный режим. В режиме настройки осуществляется исследование трансформатора при подаче на него постоянного напряжения, а также проведение опытов холостого хода и короткого замыкания. Данные исследования позволяют осуществлять контроль параметров трансформатора и сварочной цепи в режиме реального времени. Весь процесс настройки проходит в автоматическом режиме и занимает не более 10 секунд.

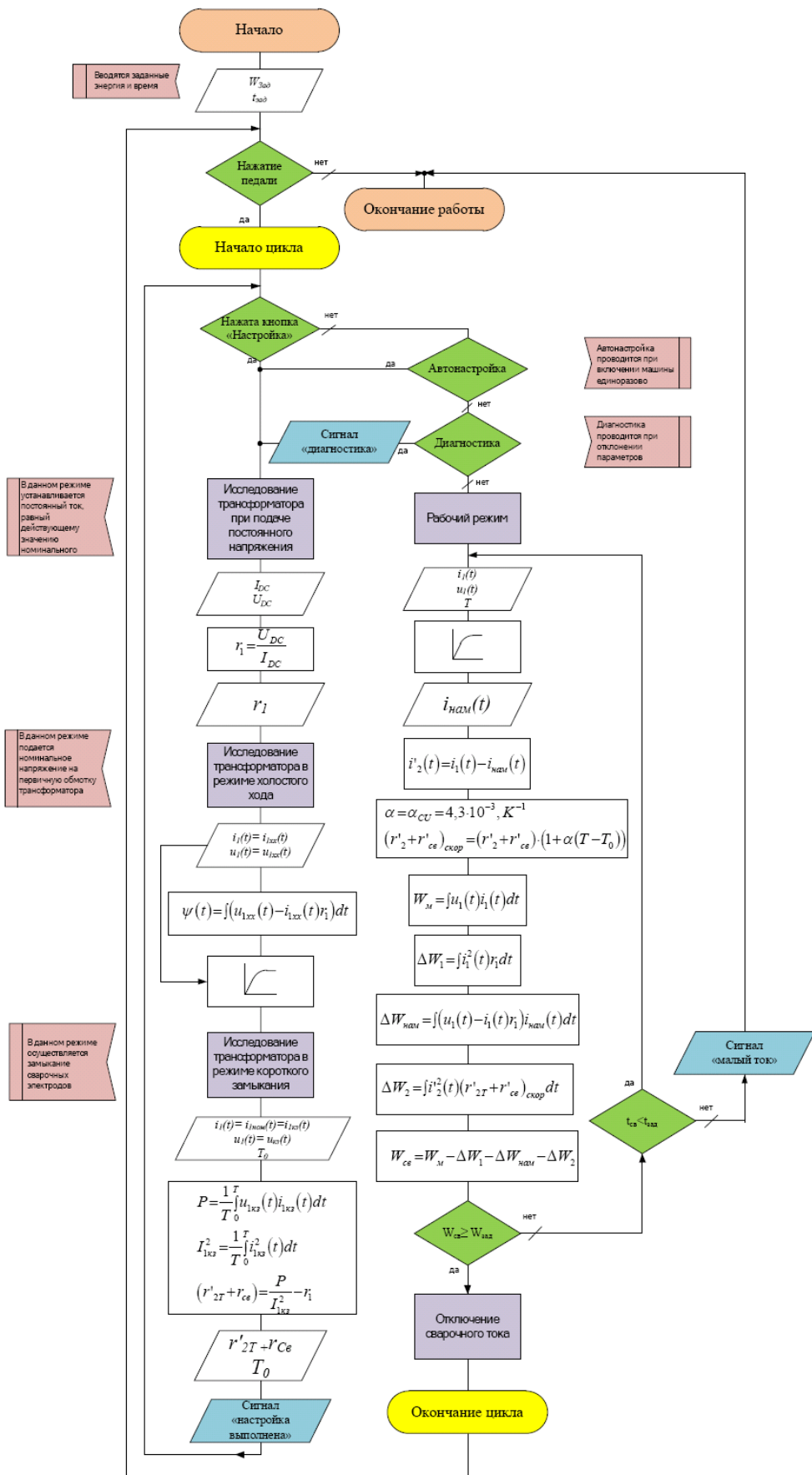


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритма управления сварочным процессом [44]

Режим «Исследование трансформатора при подаче на него постоянного напряжения» служит для определения активного сопротивления первичной обмотки трансформатора.

В течение этого опыта электроды машины контактной сварки не соединяются. Если источник питания МКС состоит из тиристорного прерывателя, через который к сети подключается сварочный трансформатор, СУ устанавливает углы открытия тиристорov так, чтобы в выходном напряжении преобразователя присутствовала постоянная составляющая. При этом осуществляется измерение тока и напряжения в первичной цепи. Сигналы поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), после чего производится выделение постоянной составляющей с помощью программного фильтра нижних частот (ФНЧ), частота среза которого выбрана ниже частоты сети. Частота дискретизации АЦП выбирается не меньше двукратной максимальной частоты, присутствующей в спектре входного сигнала, с другой стороны она ограничивается возможностями микроконтроллера.

СУ производит расчет активного сопротивления первичной обмотки трансформатора, которое будет в дальнейшем использоваться в расчетах. Алгоритм цифровой обработки сигнала для данного режима приведен на рис. 3.5. Здесь и далее n – номер отсчета, T_s – период дискретизации.

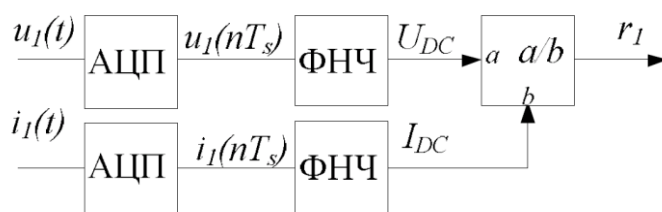


Рисунок 3.5 – Система цифровой обработки сигнала в режиме «Исследование трансформатора при подаче на него постоянного напряжения»

Следующий опыт – «Исследование трансформатора в режиме холостого хода» – выполняется для получения его вебер-амперной характеристики. В режиме холостого хода СУ подает на трансформатор с

выхода преобразователя напряжение, которое измеряется в течение опыта. При этом электроды МКС не соединяются. СУ осуществляет снятие вебер-амперной характеристики трансформатора (характеристики намагничивания). Алгоритм цифровой обработки сигнала для данного режима приведен на рис. 3.6.

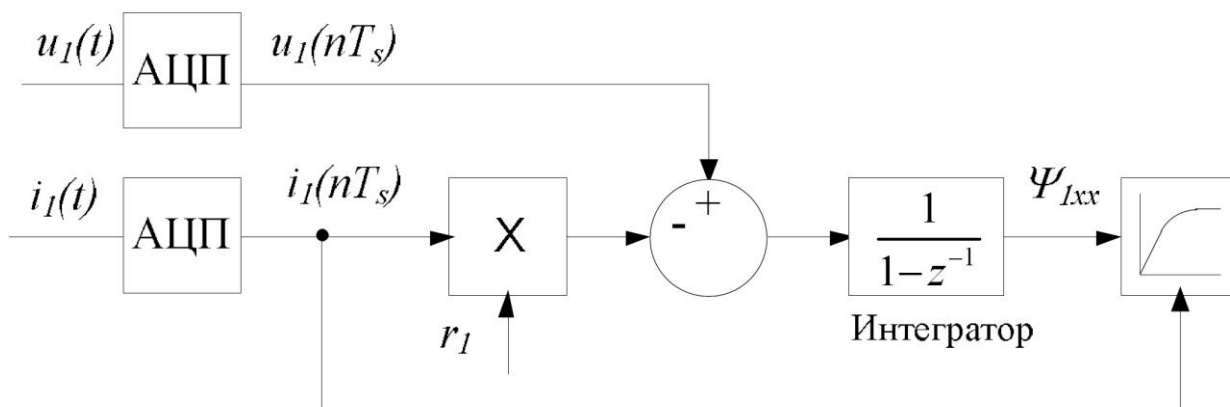


Рисунок 3.6 – Система цифровой обработки сигнала в режиме «Исследование трансформатора в режиме холостого хода»

Для определения сопротивления сварочной цепи СУ переходит в режим «Исследование трансформатора в режиме короткого замыкания», подавая на трансформатор такое напряжение, чтобы первичный ток был равен номинальному значению, в течение которого фиксирует напряжение и ток первичной цепи. При этом СУ подает сигнал на замыкание сварочных электродов.

По результатам измерений в СУ рассчитываются активная мощность и приведенное к первичной обмотке активное сопротивление сварочной цепи, которое включает в себя сопротивление вторичной обмотки трансформатора, сопротивление сварочной цепи и сопротивление участка «электрод-электрод» за исключением сопротивления первичной цепи, рассчитанного ранее. Алгоритм цифровой обработки сигнала для данного режима приведен на рис. 3.7.

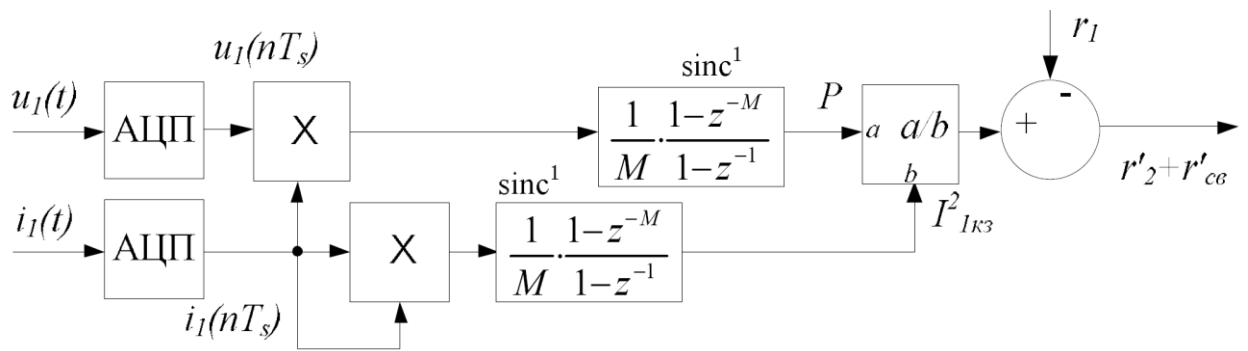


Рисунок 3.7 – Система цифровой обработки сигнала в режиме «Исследование трансформатора в режиме короткого замыкания»

Усреднение входных отсчетов для нахождения активной мощности и квадрата действующего значения тока осуществляется посредством программного sinc-фильтра первого порядка, осуществляющего операцию нахождения среднего арифметического в окне шириной M отсчетов.

Также в данном режиме СУ осуществляет измерение начальной температуры токоподводящих элементов сварочной цепи T_0 .

По окончании режима настроек СУ выдает сигнал «Настройка выполнена», после чего осуществляется проверка условий «Автонастройка» и «Диагностика». Условие «Автонастройка» будет истинно при подаче питания в момент включения машины. При последующих циклах сварки автонастройка не проводится. Если условие «Автонастройка» истинно, система переходит в режим настройки, как уже было описано выше. Условие «Диагностика» будет истинно в том случае, если СУ регистрирует значительное отклонение параметров трансформатора и сварочной цепи. При этом выдается сигнал «Диагностика», и система переходит в режим настройки, как было описано выше.

Если диагностика не требуется, СУ автоматически переходит в рабочий режим, во время которого постоянно происходит измерение первичных напряжения и тока и температуры сварочной цепи.

Во время работы машины контактной сварки СУ осуществляет коррекцию активного сопротивления сварочной цепи с учетом температурного коэффициента сопротивления.

В режиме реального времени в течение сварочного цикла СУ контролирует величину потокосцепления и по характеристике намагничивания определяет ток намагничивания $i_{нам}(t)$, после чего определяет величину вторичного тока, приведенного к первичной цепи $i'_2(t)$.

Далее СУ осуществляет в реальном времени расчет энергии, потребляемой трансформатором от преобразователя в течение формирования сварной точки. Система цифровой обработки сигналов для расчета энергии приведена на рис. 3.8.

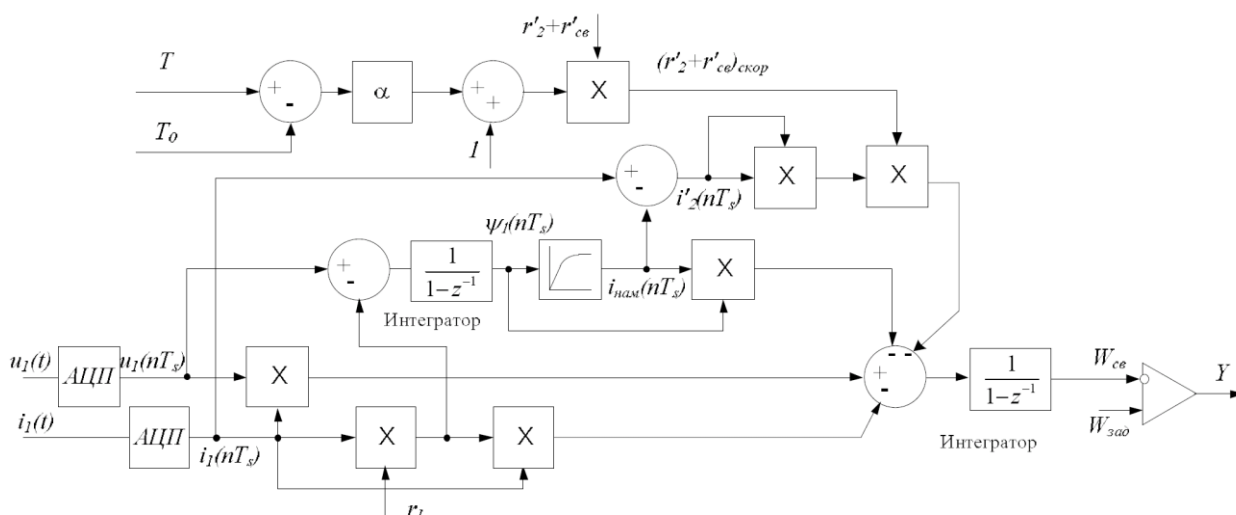


Рисунок 3.8 – Система цифровой обработки сигнала в рабочем режиме

Отключение сварочного тока осуществляется при достижении рассчитанной энергией заданной величины, в противном случае подача сварочного тока продолжается. При этом также осуществляется контроль времени подачи сварочного тока. При превышении им заданной величины выдается сигнал «малый ток», и работа сварочной машины прекращается. Наиболее вероятной причиной уменьшения сварочного тока является увеличение сопротивления электродов, вызванное ухудшением состояния их поверхностей. При появлении сигнала «малый ток» оператор выполняет

ревизию электродов, после чего осуществляется повторное включение сварочной машины, и работа возобновляется в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 3.4.

Рассмотренная СУ нечувствительна к изменению реактивного сопротивления, вызванному внесением ферромагнитных масс в сварочный контур, поскольку расчет энергии, требуемой для сварочного процесса, осуществляется по балансу активной мощности.

Экспериментальная проверка рассмотренного способа была проведена в лабораторных условиях. На рис. 3.9 приведена упрощенная структурная схема подключения исследуемой машины контактной сварки МТПУ-300 к сети с интегрированным в СУ источником питания блоком управления.

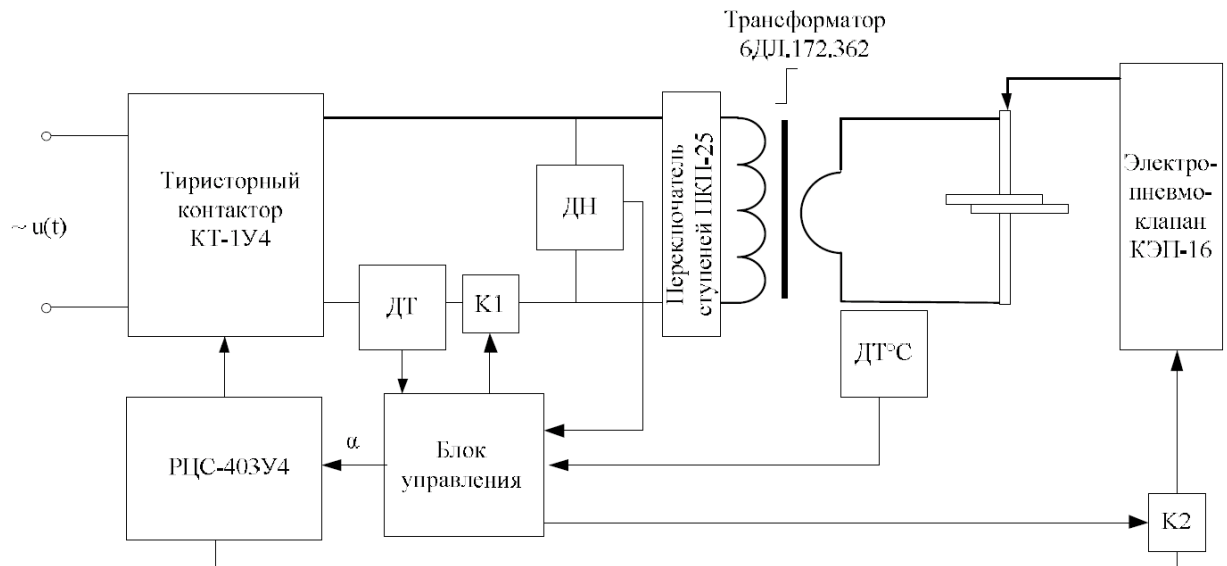


Рисунок 3.9 – Структурная схема подключения исследуемой машины контактной сварки к сети

Исследуемый источник питания машины контактной сварки МТПУ-300 состоит из сварочного трансформатора, подключаемого к электрической сети посредством тиристорного контактора КТ-1У4, с переключателем ступеней ПКП-25. Управление сварочным процессом осуществляется с помощью регулятора цикла сварки РЦС-403У4.

В существующую систему интегрирован разработанный блок управления, выполненный на однокристальном микроконтроллере STM32F100C6T6B. Частота дискретизации АЦП – 20 кГц на канал. Измерение токов в первичной цепи трансформатора осуществлено с помощью токовых клещей МТ87, в которых реализована активная компенсация сопротивлений вторичных обмоток трансформатора тока, что позволяет на порядок снизить фазовую погрешность при 50 Гц [45]. Измерение напряжения выполнено с помощью резистивного делителя напряжения. Измерение температуры осуществлялось при помощи цифрового датчика температуры DS18B20.

На рис. 3.10 изображена экспериментальная установка с разработанным блоком управления в момент снятия характеристики намагничивания трансформатора в режиме холостого хода. При этом осуществляется передача данных на ПК. Полученная при этом вебер-амперная характеристика трансформатора приведена на рис. 3.11.



Рисунок 3.10 – Экспериментальная установка

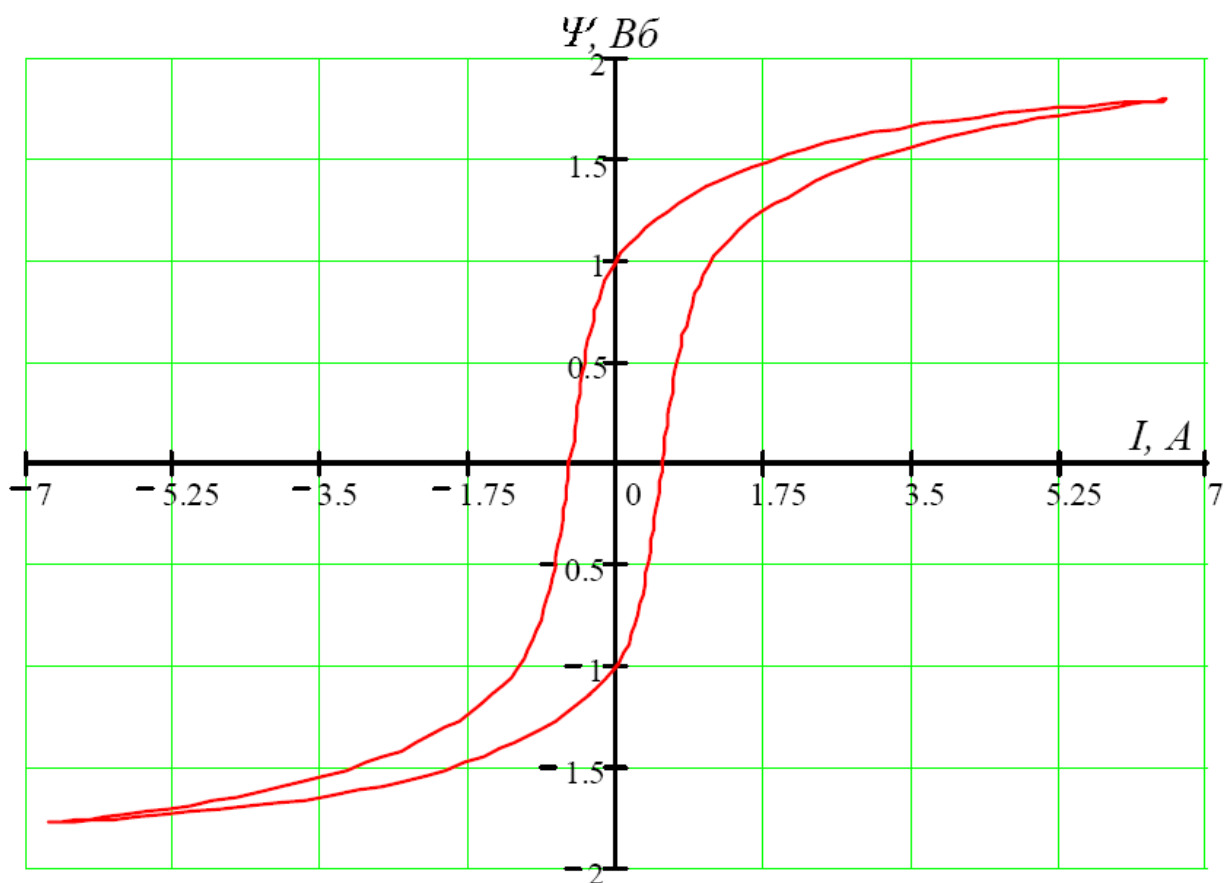


Рисунок 3.11 – Характеристика намагничивания трансформатора

Выходным сигналом блока управления в рабочем режиме является сигнал на отключение сварочного тока, для реализации чего в первичную цепь дополнительно введен ключ К1, размыкающий первичную цепь до срабатывания реле времени цикла «Сварка» регулятора РЦС-403У4, уставка которого выставляется максимально возможной. Остальные циклы сварки не изменяются.

Для работы в режиме настройки, которая выполняется при включении машины в сеть (единоразово), в цепь питания электропневмоклапана введен дополнительный ключ К2, разрывающий цепь при работе системы в режимах, где не требуется сведение электродов (исследование трансформатора при подаче на него постоянного напряжения и холостого хода). При этом углы управления тиристоров устанавливаются в соответствии с вышеописанными рекомендациями посредством регулятора «Нагрев» блока РЦС-403У4. В режиме короткого замыкания электроды

соединяются между собой, при этом углы управления тиристорами устанавливаются таким образом, чтобы напряжение, подаваемое на первичную обмотку трансформатора, не превышало 10% от номинального.

В результате экспериментальных исследований удалось добиться высокого качества сварных соединений при наличии внешних возмущений, таких как загрязнение и износ электродов, наличие отклонений напряжения сети.

3.2 Управление процессами контактной точечной и шовной сварки

Известны устройства для управления процессом точечной контактной сварки, содержащие узлы измерения электрических параметров сварочного процесса, блоки выделения сигнала рассогласования, узел формирования сигнала управления, соединенный с блоком управления величиной сварочного тока [31].

Известные устройства не обеспечивают необходимой стабильности свойств точечносварных соединений при воздействии на технологический процесс возмущения высокой интенсивности.

Известны также устройства, содержащие зонды, соприкасающиеся с поверхностью деталей со стороны электродов сварочной машины, датчики напряжений между электродами и между зондами, датчик сварочного тока» блок умножения, входы которого подключены к датчикам тока и напряжения между зондами, интегратор, первый вход которого соединен с выходом блока умножения, а выход связан с блоком управления [32].

Напряжение, измеряемое зондами, действует непосредственно в зоне формирования литого ядра. На выходе блока умножения формируется сигнал, пропорциональный мощности, а на выходе интегратора формируется сигнал, пропорциональный энергии, введенных в зону формирования литого ядра. При увеличении сигнала на выходе интегратора до заданного уровня срабатывает релейный элемент, выключающий

сварочный ток. Тепловая энергия, вводимая в зону формирования литого ядра при использовании этого устройства, постоянна, а воздействие возмущений компенсируется изменением длительности включения сварочного тока.

Недостатком этого устройства является невысокая стабильность свойств, т. е. невысокое качество точечносварных соединений при использовании его в случае загрязнения поверхности электродов и деталей, изменения геометрии электродов в процессе эксплуатации, нестабильности усилия сжатия электродов машины. Невысокая стабильность свойств соединений объясняется тем, что энергия, вводимая в зону формирования литого ядра, частично отводится в электроды машины. Количество отведенной энергии зависит как от длительности сварки, так и от состояния контактов между электродами и деталями. Длительность сварки при использовании известного устройства нестабильна и изменяется под действием возмущений. Состояние контактов между электродами машины и деталями также изменяется под действием возмущений, изменяющих электропроводность и теплопроводность этих контактов. Вследствие этого при воздействии возмущений изменяется количество тепла, отводимого из зоны формирования литого ядра за время сварки. Так как количество энергии, вводимой в эту зону, поддерживается постоянным, теплосодержание зоны формирования литого ядра в момент выключения сварочного тока оказывается нестабильным, что приводит к нестабильности структуры и размеров литого ядра, т. е. к невысокому качеству точечносварных соединений.

Устройство (рис. 3.12) для управления процессом точечной контактной сварки содержит датчик 1 для измерения напряжения между электродами 2 сварочной машины 3, датчик 4 для измерения напряжения между зондами 5, соприкасающимися с поверхностью свариваемых деталей 6, а также датчик 7 для измерения сварочного тока. Датчики 1, 4 подключены к входам блока 8 вычитания, Датчик 7 и блок 8 вычитания соединены с входами блока 9

умножения и блока 10 деления, выходы которых присоединены к входам интегратора 11, К выходу интегратора 11 присоединен релейный элемент 12 с управляемым порогом срабатывания, связанный с выключателем сварочного тока.

В процессе сварки на выходе тока 8 вычитания формируется сигнал, равный падению напряжения в зонах контактов "электрод-деталь", на выходе блока 9 умножения формируется сигнал, пропорциональный мощности, рассеиваемой в зоне формирования литого ядра, а на выходе блока 10 деления формируется сигнал, пропорциональный суммарной электропроводности приконтактных зон. На первый вход интегратора 11 поступает сигнал мощности с выхода блока 9 умножения, а на второй вход интегратора 11 поступает сигнал с выхода этого интегратора 11. Под воздействием этих сигналов на выходе интегратора 11 формируется сигнал, пропорциональный теплосодержанию зоны формирования литого ядра, так как температура и теплосодержание пропорциональны, а коэффициент передачи интегратора 11, соединенный с его выходом, отображает термическое сопротивление контактов; между электродами 2 и деталями 6, через которые в процессе сварки охлаждается зона формирования литого ядра. Одновременно на управляющий коэффициентом передачи вход интегратора 11 поступает сигнал с выхода блока 10 деления, обеспечивая соответствие коэффициента передачи по второму входу интегратора 11 действительному состоянию контактов "электрод-деталь». При увеличении сигнала на выходе интегратора 11 до заданного значения, соответствующего необходимому для обеспечения требуемых размеров литой зоны теплосодержанию зоны формирования литого ядра, срабатывает релейный элемент 12, включающий сварочный ток.

При случайном увеличении теплопроводности и связанной с ней электропроводности контактов «электрод-деталь», например, при увеличении скорости сжатия электродов 2 или увеличении площади соприкосновения электродов 2 с деталями 6, сигнал на выходе блока 10

деления увеличивается и увеличивается коэффициент передачи интегратора 11 по второму входу, присоединенного к выходу интегратора 11. Это приводит к уменьшению скорости нарастания сигнала на выходе интегратора 11, что отражает замедление увеличения теплосодержания и температуры зоны формирования литого ядра при увеличении охлаждающих тепловых потоков. Уменьшение скорости нарастания сигнала на выходе интегратора 11 при постоянном пороге срабатывания релейного элемента 12 приводит к увеличению длительности протекания сварочного тока, что компенсирует увеличение теплоотвода, обеспечивая стабильность теплосодержания зоны формирования литого ядра в момент выключения тока, т. е. стабильность размеров литой зоны и высокое качество соединения.

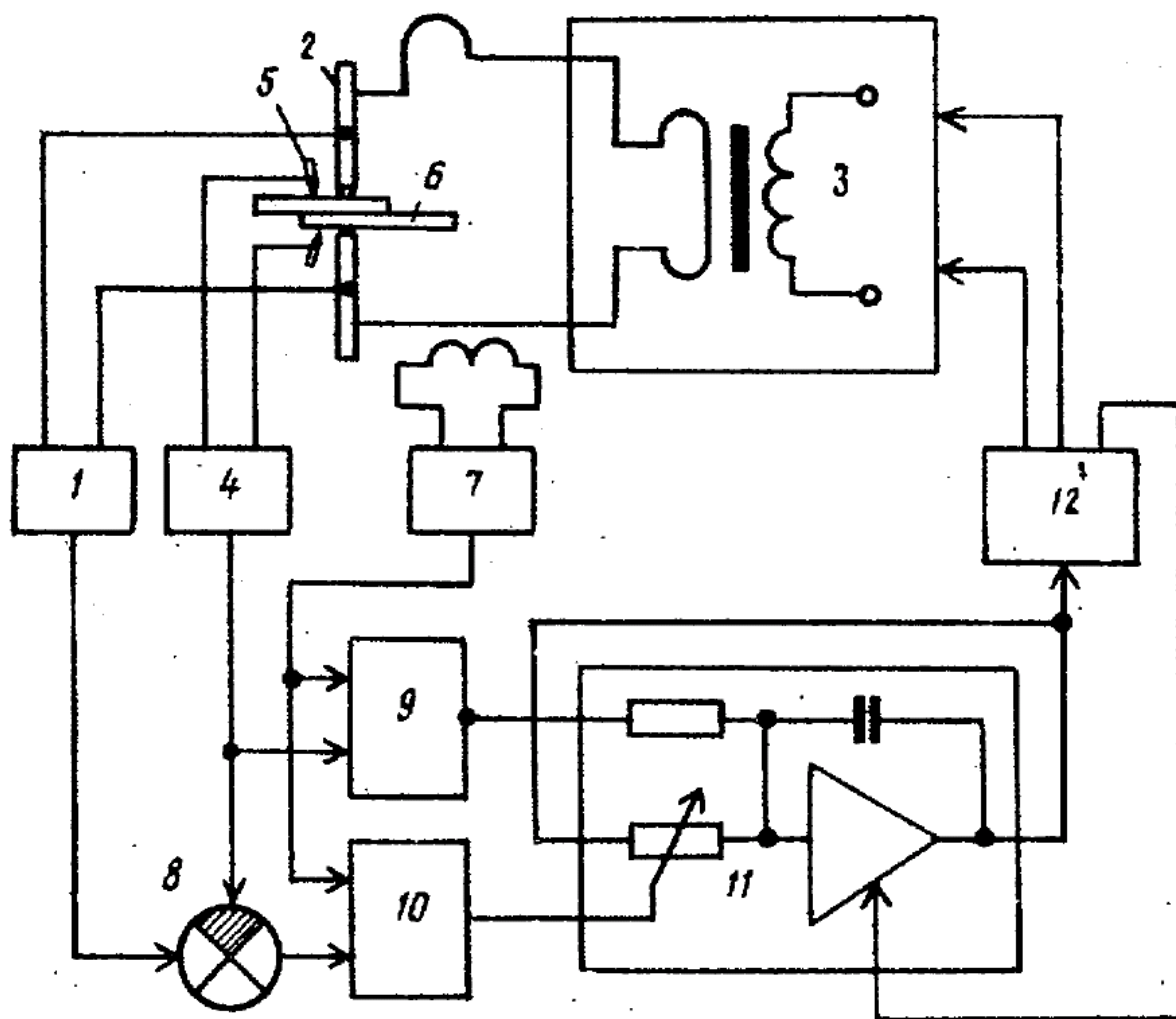


Рисунок 3.12 – Устройство для управления контактной сваркой

Устройство обеспечивает высокую стабильность свойств точечносварных соединений; выполненных контактной сваркой, при воздействии на процесс технологических возмущений высокой интенсивности. Это позволяет значительно снизить требования к качеству подготовительных операций - зачистке поверхности изделий перед сваркой, травлению и т. д., увеличить допустимые загрязнение и износ электродов до их переточки, снизить требования к стабильности усилия сжатия электродов машины, а также снизить требования к контролю технологического процесса. Указанные преимущества позволяют снизить стоимость сварки и повысить качество соединений.

3.3 Исследование теплового баланса при контактной сварке

Количество энергии Q_{Σ} , которое идёт на формирование сварной точки, определяется из уравнения теплового баланса при контактной сварке [33, 34, 46] (рис. 3.13). Численное значение Q_{Σ} может быть получено суммированием количеств теплоты, отвечающих за протекание процессов при контактной сварке согласно табл. 3.1:

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (3.8)$$

Таблица 3.1 – Тепловой баланс при контактной точечной сварке

| № | Тепловой процесс | Обозначение |
|---|--|-------------|
| 1 | Нагрев основного металла в области сварной точки от комнатной температуры до температуры плавления | Q_1 |
| 2 | Нагрев основного металла в области зоны термического влияния | Q_2 |
| 3 | Нагрев сварочных электродов | Q_3 |

Составляющие уравнения (3.8) могут быть определены с учётом следующих допущений. Принимают, что до температуры плавления $T_{пл}$ происходит разогрев цилиндра диаметром d_s , который равен диаметру ядра сварной точки, и высотой, которая равна толщине двух деталей $2s$. В этом случае:

$$Q_1 = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} 2s c_m \gamma_m T_{пл}, \quad (3.9)$$

где c_m – теплоёмкость свариваемого металла (0,46 Дж/(г·°C));

γ_m – плотность свариваемого металла (7,84 г/см³);

$T_{пл}$ – температура плавления металла (1480 °C).

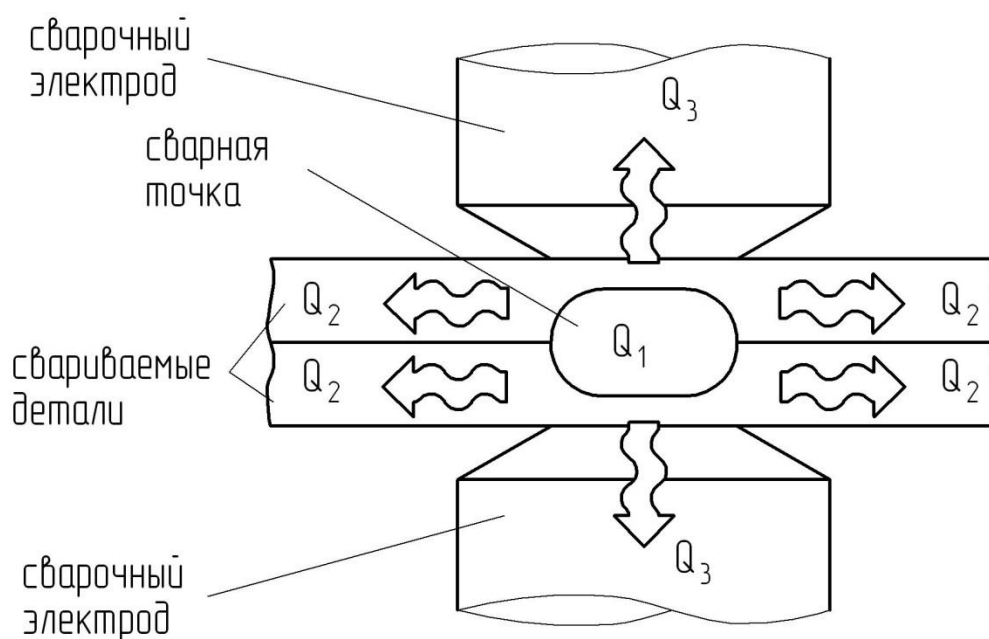


Рисунок 3.13 – Представление теплового баланса при контактной сварке

Принимают так же, зона термического влияния ограничивается расстоянием x_1 от ядра сварной точки. Значение величины x_1 задаётся исходя из времени сварки $t_{св}$ и коэффициента температуропроводности a_m основного металла в соответствии с формулой:

$$x_1 = 4\sqrt{a_m t_{св}}, \quad (3.10)$$

где a_m – значение коэффициента температуропроводности основного металла (0,08 см²/с)

Если принять, что кольцо шириной x_1 вокруг сварной точки диаметром $d_э$ нагревается до температуры $0,25T_{пл}$, то площадь нагреваемого кольца может быть вычислена как:

$$\frac{\pi \cdot (d_э + 2x_1)^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_э^2}{4} = \frac{\pi(d_э^2 + 4d_эx_1 + 4x_1^2 - d_э^2)}{4} = \pi x_1(d_э + x_1), \quad (3.11)$$

объём нагреваемого кольца вычисляется как:

$$\pi x_1(d_э + x_1)2s \quad (3.12)$$

и количество теплоты Q_2 может быть вычислено как

$$Q_2 = k_1 \pi x_1(d_э + x_1)2s c_m \gamma_m 0,25T_{пл}, \quad (3.13)$$

где k_1 – коэффициент, который учитывает наличие неравномерности распределения температуры в кольце, принимается $k_1=0,8$.

Вычисление отвода тепла в сварочные электроды может существенно упрощено, если принять, что всё тепло Q_3 идёт на нагрев электрода до средней температуры $T_{пл}/8$ на участке длиной

$$x_2 = 4\sqrt{a_э t_{св}}, \quad (3.14)$$

где $a_э$ – значение коэффициента, учитывающего температуропроводность металла электродов (принимают $a_э = 0,08$ см²/с).

С учётом (3.14) нагреваемый объём электрода может быть вычислен как

$$k_2 \frac{\pi \cdot d_э^2 x_2}{4}, \quad (3.15)$$

где k_2 – значение коэффициента, учитывающего форму электрода ($k_2=1$ для цилиндрических электродов; $k_2=1,5$ для конических электродов, имеющих плоскую рабочую поверхность; $k_2=2$ для конических электродов, имеющих сферическую рабочую поверхность).

С учётом (3.15) теплоотводы в сварочные электроды Q_3 может быть вычислен как:

$$Q_3 = 2k_2 \frac{\pi d_э^2}{4} x_2 c_э \gamma_э \frac{T_{пл}}{8}, \quad (3.16)$$

где $\gamma_э$ - плотность металла электрода (8,9 г/см³);

$c_э$ – теплоёмкость металла электрода (0,388 Дж/(г·°C)).

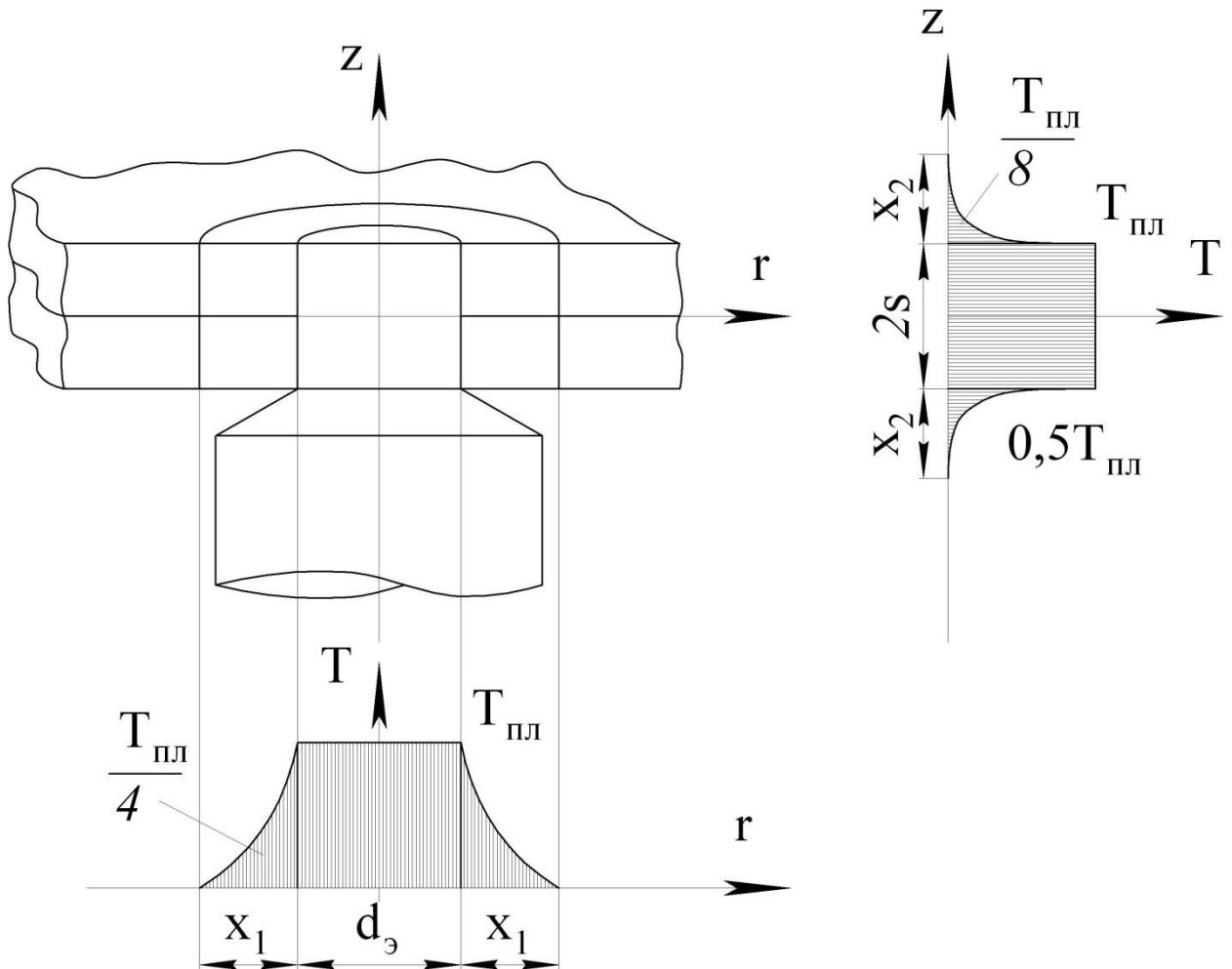


Рисунок 3.14 – К расчёту теплового баланса
в процессе контактной точечной сварки

Формулы (3.8)...(3.16) позволяют производить оценочные расчёты теплового баланса при контактной точечной сварке. Оценку выделяющегося при сварке тепла произведём для толщин 1+1, 2+2 и 3+3 мм. Значения параметров режима сварки назначим с использованием литературных источников [47] (табл. 3.2).

Эффективный КПД сварки вычислим как отношение количества тепла, израсходованного на нагрев свариваемых деталей (Q_1+Q_2) к полному количеству тепла Q_{Σ} :

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_{\Sigma}} \cdot 100\% . \quad (2.10)$$

Таблица 3.2 – Режимы точечной сварки низкоуглеродистых сталей для вычислительного эксперимента

| Толщина деталей, мм | $I_{св}$, кА | d_3 , мм | $F_{св}$, кН | $t_{св}$, сек |
|---------------------|---------------|------------|---------------|----------------|
| 1,0 | 8,5...9,5 | 5,0 | 2,5...3,0 | 0,12 |
| | | | | 0,14 |
| | | | | 0,16 |
| | | | | 0,18 |
| 2,0 | 12...13 | 7,0 | 6...7 | 0,18 |
| | | | | 0,20 |
| | | | | 0,22 |
| | | | | 0,24 |
| 3,0 | 14...15 | 9,0 | 9...10 | 0,24 |
| | | | | 0,26 |
| | | | | 0,28 |
| | | | | 0,30 |

Результаты вычисления величин Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_{Σ} и η приведены в табл. 3.3 и на диаграммах (рис. 3.15...).

С использованием формул (3.8)-(3.16) и результатов таблицы 3.3 была построена диаграмма позволяющая задавать количество теплоты, необходимое на формирование сварной точки при контактной сварке для различных толщин свариваемых деталей (рис. 3.15).

Таблица 3.3 – Тепловой баланс при контактной сварке для заданных толщин свариваемых деталей

| Толщина деталей, мм | Время сварки, сек | Количество тепла на формирование сварной точки, Дж | Количество тепла на нагрев зоны термического влияния, Дж | Количество тепла на отвод в сварочные электроды, Дж | Суммарное тепловыделение, Дж | Эффективный КПД, % |
|---------------------|-------------------|--|--|---|------------------------------|--------------------|
| s | $t_{св}$ | Q_1 | Q_2 | Q_3 | Q_{Σ} | η |
| 1,0 | 0,12 | 210 | 234 | 472 | 916 | 48,5 |
| | 0,14 | | 262 | 510 | 982 | 48,1 |
| | 0,16 | | 289 | 545 | 1044 | 47,8 |
| | 0,18 | | 316 | 578 | 1103 | 47,6 |
| 2,0 | 0,18 | 822 | 760 | 1133 | 2715 | 58,2 |
| | 0,20 | | 819 | 1195 | 2835 | 57,8 |
| | 0,22 | | 876 | 1253 | 2951 | 57,5 |
| | 0,24 | | 933 | 1309 | 3063 | 57,2 |
| 3,0 | 0,24 | 2037 | 1622 | 2164 | 5823 | 62,8 |
| | 0,26 | | 1714 | 2252 | 6004 | 62,5 |
| | 0,28 | | 1805 | 2337 | 6180 | 62,2 |
| | 0,30 | | 1895 | 2419 | 6351 | 61,9 |

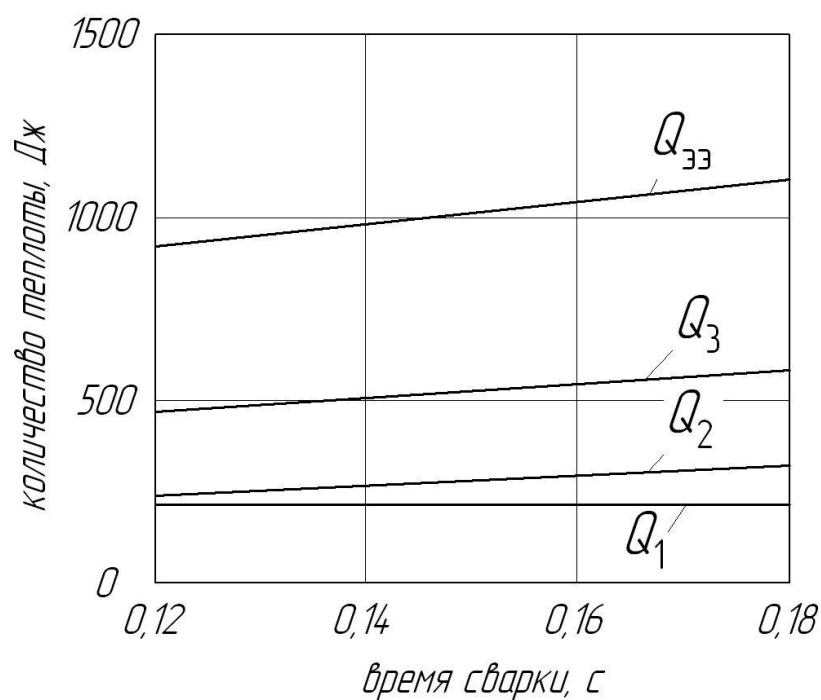


Рисунок 3.15 – Тепловой баланс при сварке образцов толщиной 1+1 мм

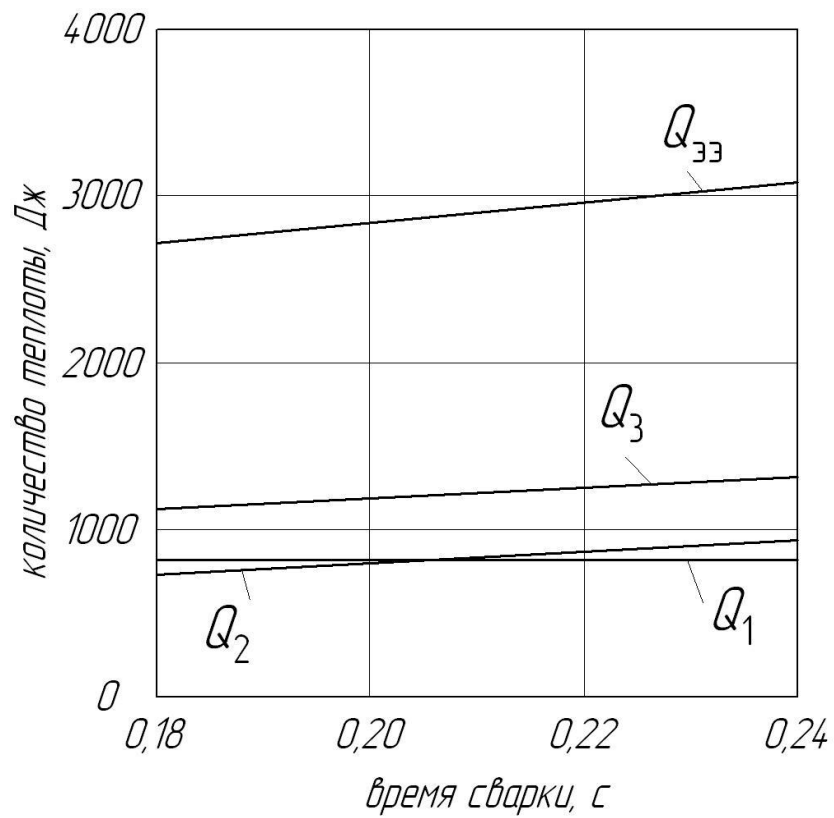


Рисунок 3.16 – Тепловой баланс при сварке образцов толщиной 2+2 мм

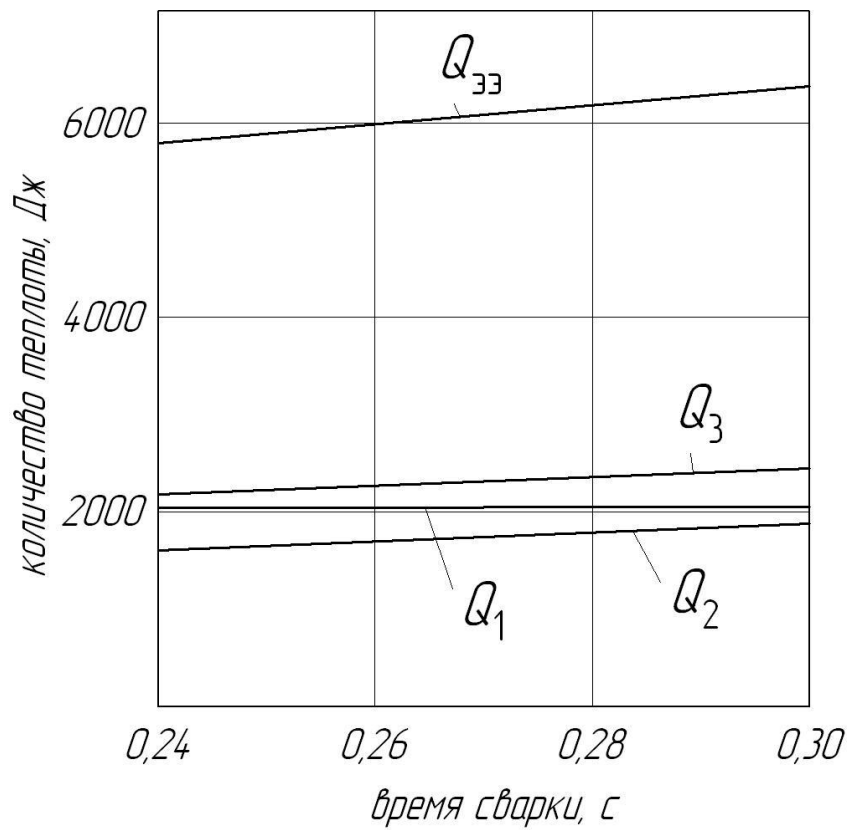


Рисунок 3.17 – Тепловой баланс при сварке образцов толщиной 3+3 мм

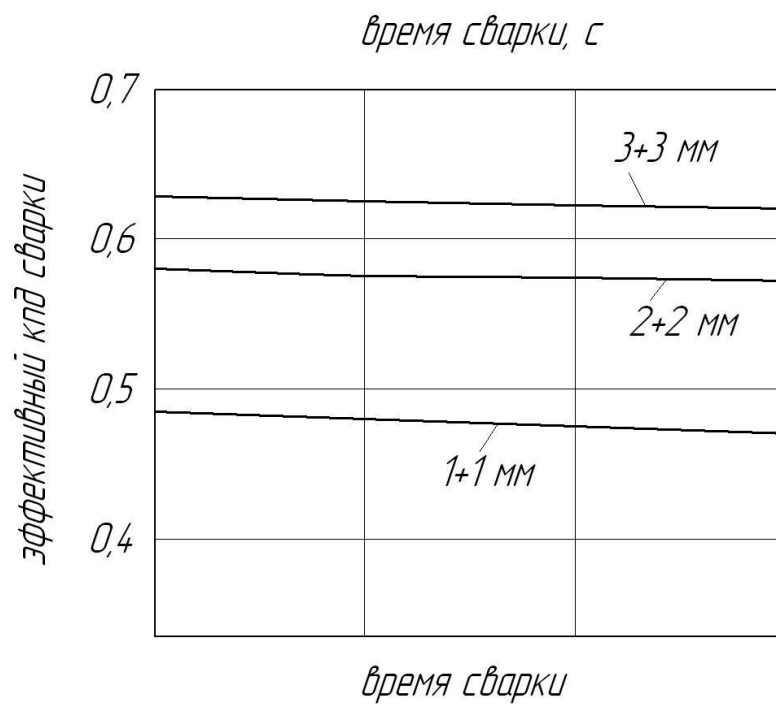


Рисунок 3.18 – Эффективный КПД при контактной сварке

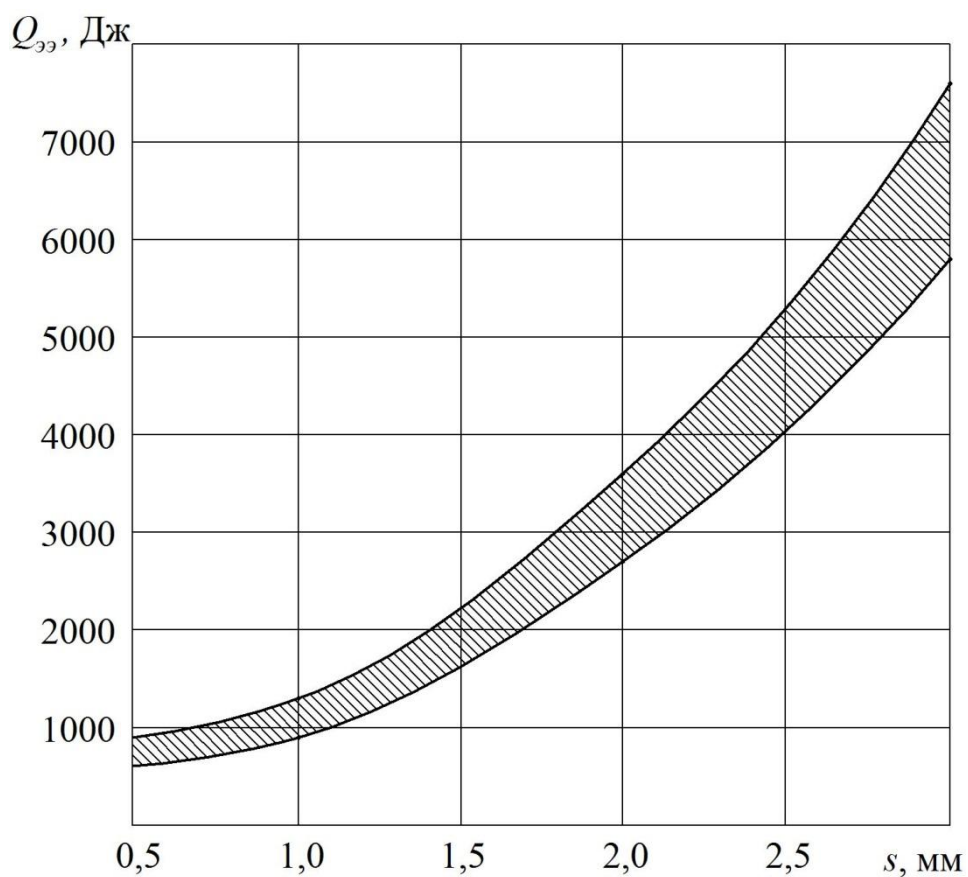


Рисунок 3.19 – Количество теплоты, необходимое для формирования сварного соединения при различной толщине свариваемых пластин из низкоуглеродистой стали

3.4 Выводы по третьему разделу

1. Управление процессом контактной точечной сварки целесообразно осуществлять с помощью регулятора энергии, что позволяет обеспечить требуемые размеры литой зоны при воздействии различных возмущений.

2. Использование предлагаемого способа стабилизации тепловыделения при контактной сварке позволяет обеспечить управление сварочным током, избежать влияния изменения полного сопротивления сварочной цепи, вызванного внесением ферромагнитных масс в него, изменением температуры во время сварочного процесса, наличием отклонений, колебаний питающего напряжения.

3. Разработанная система управления позволяет производить диагностику состояния сварочного трансформатора и электродов в режиме реального времени, что позволяет избежать ухудшения качества сварки в процессе работы.

4. Оснащение находящихся в эксплуатации и вновь разрабатываемых машин контактной сварки устройствами управления, реализующими описанный способ стабилизации тепловыделения при контактной сварке, позволит в существенной степени повысить качество сварных соединений.

5. Экспериментальная проверка в лабораторных условиях показала эффективность предложенного способа стабилизации тепловыделения в сварочном контакте, благодаря чему удалось добиться повышения качества сварки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Частичная компенсация возмущений при контактной сварке возможна при автоматическом регулировании процесса сварки, при этом в качестве измеряемых параметров целесообразно использовать электрические параметры (ток сварки, сопротивление участка «электрод-электрод» и тепловыделение на нём). Измерение и регулирование электрических параметров требует математического описания электрических процессов при контактной в контактной машине и разработки методики экспериментального определения параметров контактной машины и процесса сварки.

В диссертации предложена методика измерения активной и индуктивной составляющих полного сопротивления машин контактной сварки, предусматривающая включение машины в режиме короткого замыкания и анализ измеренных значений тока.

На основании моделирования электрических процессов при контактной сварке предложена методика расчётного определения электрических параметров (ток сварки, сопротивление участка «электрод-электрод» и тепловыделение на нём). Предложенная методика прошла апробацию в условиях производства.

Использование предлагаемого способа стабилизации тепловыделения при контактной сварке позволяет обеспечить управление сварочным током, избежать влияния изменения полного сопротивления сварочной цепи, вызванного внесением ферромагнитных масс в него, изменением температуры во время сварочного процесса, наличием отклонений, колебаний питающего напряжения. Экспериментальная и расчётная проверка показала эффективность предложенного способа стабилизации тепловыделения в сварочном контакте.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулисон, Э. Новые подходы к управлению качеством в сварочном производстве США / Э. Кулисон, Б. Ирвинг, М.Р. Йонсен // Автоматическая сварка. – 1994. – № 1. – С. 39–47, 53.
2. Чуларис, А.А. Расчет и проектирование оборудования для контактной сварки: Учеб. пос. / А.А. Чуларис, А.И. Попов, Н.Г. Чередниченко, Д.В. Рогозин – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2003. – 162 с.
3. Julie E. Simmons Classification of spot welds using power factor time profiles / Julie E. Simmons, Stephen M. Pollock // Department of Industrial and Operations Engineering University of Michigan. – Technical Report № 97-02 . – March 1997.
4. Оборудование для контактной сварки: Справочное пособие / Под ред. В.В. Смирнова. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 848 с.
5. Dorn, L. Influence of the mechanical properties of resistance welding machines on the quality of spot welding / L. Dorn, P. Xu // Schweißen und Schneiden. – 1993. – № 1. – S. E2–E14.
6. Tang, H. Influence of Welding Machine Mechanical Characteristics on the Resistance Spot Welding Process and Weld Quality / Tang, H., Hou, W., Hu, S. J., [et al.] // Weld. J. – 2003. – № 82(5). – P. 116–124.
7. Патент № 56099082 Япония, МПК3 В 23 К 11/24. Resistance welding infrared–ray temperature monitor / Kajiwara Ryoichi, Ogura Satoshi, Shida Tomohiko; Заявл. 14.01.80; Оpubл. 10.08.81.
8. Патент № 1130883 Япония, МПК4 В 23 К 11/24. Failure detector for spot welding machine / Honda Minoru; Заявл. 17.11.87; Оpubл. 23.05.89.
9. А.с. 79640 СССР, МПК1 В 23 К 11/24. Устройство для автоматического контроля контактной сварки / Васильев Г.Я.; Заявл. 8.12.48; Оpubл. 28.02.50.
10. А.с. 1412908 СССР, МПК В 23 К 11/10. Способ автоматического управления термическим циклом контактной сварки и устройство для его

осуществления / Ю.А. Мишунин, С.Н. Смеляков; Заявл. 28.10.86; Оpubл. 30.07.88, Бюл. № 28.

11. Аксельрод, Д.Ф. Микропроцессорные контроллеры для машин контактной сварки / Д.Ф. Аксельрод, Ю.Е. Иоффе, М.Н. Куперман и др. // Сварочное производство. – 1990. – №8.

12. Иоффе, Ю.Е. Новые разработки ЗАО «Электрик–МИКС» в области контроля и управления сварочными процессами / Иоффе Ю.Е., Жданов В.В., Котов А.В. [и др.] // Сварочное производство. – 2002. – № 4. – С. 39–43.

13. Martin, O.E. For maintaining weld quality / O.E. Martin // Welding Journal. – 1976. – № 8. – P. 655–660.

14. Патент № 5523541 США, МПК6 В 23 К 11/24. Method and apparatus for controlling constant current for resistance welding / Sakaе Ishikawa; Заявл. 12.10.94, опубл. 04.06.96.

15. Ланкин, Ю.Н. Автоматическое регулирование режима точечной сварки по электрическим параметрам // Автоматическая сварка. – 1963. - № 5. – С. 16-19.

16. Чакалев, А.А. Саморегулирование процесса контактной сварки / А.А. Чакалев, С.М. Казаков, В.А. Ерофеев // Сварочное производство. – 1986. – № 8. – С. 1–3.

17. Шелег, В.К. Влияние шунтирования тока при контактной точечной сварке на диаметр сварной точки / В.К. Шелег, Ю.А. Цумарев // Вестник машиностроения. - № 6. – 2013. – С. 57–58.

18. Куликов В.П. Непровары при контактной сварке / В.П.Куликов // Сварочные технологии и оборудование. – 2005. - № 1. – С.4–11.

19. Новиков, А.В. Исследование и внедрение технологии УЗК качества точечной сварки кузовов автомобилей LADA в ОАО «АВТОВАЗ» / А.В. Новиков, Р.Р. Хакимьянов, В.В. Григорович, А.В. Семеренко // В мире неразрушающего контроля. – 2009. - № 2.- С. 66-69.

20. Tuttle, R.A. Ultrasonic Spot Weld Testing and Profitability in the Automotive Industry / R.A. Tuttle, B. Frazzini // *Materials Evaluation*. – 2006. – Nov. – P. 1064-1066.

21. Климов, А.С. Продолжительность включенного состояния тиристоров как параметр обратной связи в системах автоматического управления контактной точечной сваркой / А.С. Климов, А.К. Кудинов, А.А. Герасимов, А.Н. Анциборов // *Сварочное производство*. – 2009. – № 2. – С. 17–22.

22. Климов, А.С. Параметрическая стабилизация контактной сварки / А.С. Климов, А.В. Комиренко, А.Н. Анциборов, В.С. Климов // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. – 2010. – № 2. – С. 104–109.

23. Комиренко, А.В. Микропроцессорное управление контактной сваркой / А.В. Комиренко, А.С. Климов, В.С. Климов, А.Н. Анциборов // *Автоматизация и современные технологии*. – 2012. – № 9. – С. 3–10.

24. ГОСТ 15878-79 Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры – Введ. 1980-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 9 с.

25. Лебедев, В.К. Системы питания машин для контактной сварки / В.К. Лебедев, А.А. Письменский // *Автоматическая сварка*. – 2001. – № 11. – С. 32–36.

26. Патент РФ № 2311273. Способ автоматического измерения и регулирования тепловыделения при контактной точечной сварке / А.С. Климов, А.А. Герасимов, А.Н. Анциборов, М.С. Гончаров // *Бюл. № 33*. – Кл. В23К 11/24. – 2007.

27. Патент РФ № 2309030. Способ управления сварочным током при контактной точечной сварке / А.С. Климов, А.А. Герасимов, Н.П. Анциборов, М.С. Гончаров // *Бюл. № 30*. – Кл. В23К 11/24. – 2007.

28. Климов А.С. Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.

29. Климов, А.С. Способ измерения тока при контактной сварке / А.С. Климов, А.К. Кудинов, А.В. Комиренко, А.Н. Анциборов // Сварочное производство. – 2012. – № 10. – С. 46–49.

30. Климов, А.С. Компьютерный комплекс для исследования и управления процессами сварки / А.С. Климов, Н.П. Анциборов, А.А. Герасимов, М.С. Гончаров // Сварочное производство. – 2006. – № 3. – С. 32–34.

31. Орлов, Б.Д. Контроль точечной и роликовой электросварки / Б.Д. Орлов, П.Л. Чулошников, В.Б. Верденский, А.Л. Марченко // М. : Машиностроение, 1973. – 304 с.

32. Патент № 5591355 США, МПК6 В 23 К11/24. Method for controlling resistance welding using fuzzy reasoning / Ishikawa S.; Заявл. 09.02.95; Опубл. 07.01.97.

33. Кочергин, К. А. Контактная сварка / К. А. Кочергин // Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 1987. – 240 с.

34. Орлов, Б.Д. Технология и оборудование контактной сварки / Б.Д. Орлов, А.А. Чакалев, Ю.В. Дмитриев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.

35. Поляков А.Ю. Система автоматического управления процессом контактной рельефной сварки / А.Ю. Поляков, С.М. Фурманов, Т.И. Бендик // Вестник Белорусско-Российского университета. – № 4 (41). – 2013. – С. 75–84.

36. Руденко П.М. Система автоматического управления и контроля процесса контактной точечной сварки КСУ КС 02 / П.М. Руденко, В.С. Гавриш // Автоматическая сварка. – 2007. – № 11. – С. 43–45.

37. Климов В.С. Стабилизация тока контактной сварки в условиях износа электродов / В.С. Климов, А.С. Климов, А.К. Кудинов // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Технические науки. – № 10 (19). – 2015. – С. 72–74.

38. Пат. 2424097 Россия, МПК В 23 К 11/24. Способ стабилизации тепловыделения при контактной точечной сварке / А.С. Климов, А.В. Комиренко, В.С. Климов, А.Н. Анциборов. – № 2009141025/02; заявл. 05.11.09; опубл. 20.07.11, Бюл. № 20.

39. А. с. 662297 СССР, МПК В 23 К 11/24. Способ регулирования процесса электронагрева при точечной и шовной сварке / А.С. Васильев, А.И. Комарчев, В.П. Стрельников, О.В. Белахов. – № 2581907; заявл. 26.12.77; опубл. 15.05.79, Бюл. № 18.

40. А. с. 285737 СССР, МПК В 23 К 11/24. Способ регулирования процесса электронагрева / Н.П. Помухин, Г.М. Кузьмин, Ю.М. Чернявский. – № 1291783; заявл. 23.12.68; опубл. 12.10.73, Бюл. № 41.

41. Болотов, С.В. Управление размером литого ядра по величине энергии, выделяющейся в зоне контактной точечной сварки / С.В. Болотов, А.О. Воробьёв // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2008. – № 3. – С. 49–57.

42. Лашкари, М. Руководство по эксплуатации COSMOS / М. Лашкари. – Санта-Моника, 1989. – 326 с.

43. Пат. 2457497 Россия, МПК G 01 R 27/00. Способ измерения сопротивления сварочного контакта / А.С. Климов, А.В. Комиренко, В.С. Климов, А.Н. Анциборов. – № 2011113596/28; заявл. 04.07.11; опубл. 27.07.12, Бюл. № 21.

44. Поднебенная, С.К. Автоматизированная система управления источником питания машины контактной сварки / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Вісник приазовського державного технічного університету. – 2016. – № 33. – С. 131–141.

45. Бурлака, В.В. К вопросу разработки средств контроля показателей качества электроэнергии и регистрации аварийных режимов / В.В. Бурлака, С.К. Поднебенная, С.В. Гулаков // Международная научно-техническая конференция «Университетская наука-2016»: Сб. тезисов докладов в 3-х томах. – Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», 2016. – Т. 1. – С. 206.

46. Козловский, С.Н. Разработка теоретических основ технологии программированных режимов контактной точечной сварки узлов летательных аппаратов: дис. ... докт. тех. наук: защищена 1.02.2007 / С.Н. Козловский. – М.: Изд-во «МАТИ», 2007. – 237 с.

47. Климов, А.С. Основы технологии и построения оборудования для контактной сварки: учебное пособие / А.С. Климов, И.В. Смирнов, А.В. Кудинов, Г.Э. Кудинова // Тольятти: ТГУ, 2008. – 313 с.