

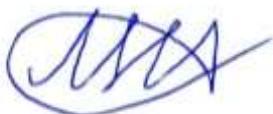
На правах рукописи

Анциборов Алексей Николаевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ПРИ ДЕЙСТВИИ
ВОЗМУЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность: 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в Тольяттинском государственном университете

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

КЛИМОВ Алексей Сергеевич

Тольяттинский государственный университет,
доцент кафедры «Сварка, обработка
материалов давлением и родственные
процессы»

Официальные оппоненты: доктор технических наук

ДУБРОВСКИЙ Владимир Анатольевич

ООО «НПП «ВЕЛД», директор

кандидат технических наук

Королев Сергей Анатольевич

МГТУ имени Н.Э.Баумана, доцент

Ведущая организация: **НИУ «МЭИ»**

Защита состоится «30» сентября 2021 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «___» 2020 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета
к.т.н.



Панкратов А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Качество и надежность соединений при контактной сварке определяется характеристиками оборудования, управляющими и возмущающими воздействиями.

Значительный вклад в решение проблемы повышения стабильности качества контактной сварки внесли Ф.А. Аксельрод, Д.С. Балковец, В.С. Гавриш, А.С. Гельман, М.П. Зайцев, К.А. Кочергин, Ю.Е. Иоффе, А.П. Исаев, А.Л. Марченко, Б.Д. Орлов, Н.В. Подола, П.М. Руденко, А.А. Урсатьев, А.А. Чакалев, П.Л. Чулошников, S.A. Gedeon, T.W. Eagar, K.I. Johnson, H.S. Cho, D.W. Dickinson и др.

Обеспечить качество контактной сварки в условиях производства призваны соответствующие системы управления, предложенные российскими и зарубежными производителями сварочного оборудования: ЗАО «Псковэлектросвар» (Россия), ЗАО «Электрик-МИКС» (Россия), ОАО «Фирма СЭЛМА» (Россия), «Bosch Rexroth» (Германия), «Welding Technology Corporation» (США), «Dengensha» (Япония), «Spotron» (Япония), «ENTRON Controls» (США). Однако колебание напряжения питающей сети, износ сварочных электродов, нестабильность усилия сжатия электродов, износ элементов вторичного контура, изменение свойств свариваемых деталей и шунтирование тока в условиях массового производства, имеющие широкий диапазон, современной аппаратурой управления компенсируются лишь частично.

Наиболее изучены и широко распространены алгоритмы стабилизации сварочного тока, реализуемые в регуляторах с применением аппроксимирующих зависимостей, построенных с учётом особенностей электрических процессов при фазовом регулировании. В массовом производстве сварка проходит в условиях интенсивного износа оборудования, который необходимо учитывать при задании параметров и управлении процессом сварки. Увеличение же количества измеряемых параметров значительно усложняет систему управления, а также увеличивает погрешность вычислений при попытке использования аппроксимирующих зависимостей.

В представленной работе проблема повышения стабильности качества контактной сварки в условиях возмущений решается на основе адаптивного алгоритма управления, учитывающего состояние сварочного оборудования и величину возмущений. Такой подход требует проведения моделирования электрических и тепловых процессов при сварке, обоснования выбора параметров обратной связи, разработки методик диагностики сварочного процесса и оборудования. Изученные закономерности следует описать аппроксимирующими зависимостями, позволяющими упростить аппаратуру управления без получения значительной погрешности вычислений.

Цель работы - повышение стабильности качества контактной сварки в условиях возмущений за счёт разработки научно обоснованных подходов к диагностике и управлению на основании изучения особенностей протекания электрических процессов в сварочном оборудовании.

Задачи исследования:

- 1) Исследование эффективности систем управления контактной сваркой в условиях возмущений и обоснование выбора параметров обратной связи для синтеза управляющего алгоритма;
- 2) Моделирование износа электродов и выработка рекомендаций по назначению параметров режима сварки, обеспечивающих безотказную работу электродов в течение смены;
- 3) Разработка методик оперативного измерения электрических характеристик контактных машин, определяющих формирование соединения при сварке в условиях возмущений;
- 4) Разработка методик расчётного и экспериментального определения электрических параметров процесса, характеризующих формирование соединения при контактной сварке в условиях действия возмущений и помех;
- 5) Разработка алгоритма управления по электрическим характеристикам контактной машины и величине контролируемого параметра.

Методы исследования:

Работа включает в себя моделирование и натурные испытания по исследованию электрических процессов в сварочном оборудовании при формировании соединения в условиях возмущений, методики диагностики сварочного оборудования (составляющих полного сопротивления контактных машин и состояния сварочных электродов), исследование особенностей формирования соединений при сварке в условиях возмущений, разработку подходов к построению аппаратуры управления контактной сваркой.

Экспериментальная сварка выполнялась на универсальных машинах МР-8010, МТПУ-300, МТ-1933, МТ-2210, специализированных многоэлектродных машинах МСМ 503.618.421 и МСМ 503.651.421 (сварка усилителя внутренней панели задней двери правого и наружной панели задней левой двери модели 1118). Управление контактной сваркой осуществляли с использованием разработанной с участием автора системы компьютерного управления контактной сваркой СК-300, микропроцессорного регулятора РКМ-803 (пр-ва ЗАО «Электрик-МИКС», г. Санкт-Петербург), PST.6250.100L – регулятора сварки серии PST 6000 (пр-ва «BOSCH REXROTH»). Для перепрограммирования регулятора PST.6250.100L применялась программная среда BOS 5000 и WinBlow.

В работе использованы как общепринятые, так и разработанные с участием автора методики измерения тока сварки, электрического сопротивления на участке «электрод-электрод», управления и диагностирования работы контактной сварочной машины, металлографические исследования точечных сварных соединений. Анализ параметров процесса сварки выполнялся при помощи регистратора сварки РКДП-0401 (пр-ва ООО «МИЦ», г. Санкт-Петербург), измерителя МИКС-2М (пр-ва ЗАО «Электрик-МИКС», г. Санкт-Петербург), анализатора сварки TE1700 (пр-ва «TECNA», Италия). Анализ макроструктуры сварных соединений проводился с использованием микроскопа «Carl Zeiss», оснащённого встроенной цифровой камерой. Испытания на срез выполняли согласно ISO 14273 с использованием разрывной машины Н50КТ (пр-ва «Tinius Olsen, Ltd.», Великобритания).

Научная новизна заключается в разработке новых подходов к регистрации параметров режима и управления циклом контактной сварки, диагностике состояния сварочного оборудования:

1. Для вычисления активного и индуктивного сопротивлений контактных машин впервые предложено использовать регулировочные характеристики $k_i \cos \varphi$ и $k_i \sin \varphi$ (где k_i – коэффициент регулирования тока, φ – угол сдвига фаз тока и напряжения при полнофазном включении), вычисляемые по аппроксимирующими зависимостям $k_i \cos \varphi = A_1 \lambda + A_0$ и $k_i \sin \varphi = B_1 \lambda + B_0$ (где λ – измеренная длительность импульса тока при фазовом регулировании, A_0 , A_1 , B_0 , B_1 – коэффициенты, зависящие от α). В диапазоне значений $\alpha = 50 \div 130$ °эл., $\cos \varphi = 0,3 \div 0,9$ предлагается аппроксимирующая зависимость $k_i \cos \varphi = -0,45\lambda - 0,94\alpha + 2,93$.

2. С применением Т-образной схемы замещения обоснована и экспериментально доказана возможность вычисления потерь в сварочном трансформаторе (насыщение сердечника и магнитные потери) по мгновенному значению первичного тока i_1 в момент времени t_λ окончания импульса вторичного тока. Действующий ток намагничивания предложено вычислять по эмпирической формуле как $i_1(t_\lambda) t_\lambda / 0,01$. Это позволяет повысить точность и помехозащищённость при расчётом определении вторичного тока по результатам измерений со стороны первичной обмотки трансформатора.

3. Впервые предложена новая регулировочная характеристика k_i / B_1 (где k_i – коэффициент регулирования тока; B_1 – первая производная k_i по α), позволяющая вычислять коррекцию $\Delta\alpha$ угла открытия тиристоров в зависимости от заданной I_2' и измеренной I_2 силы тока: $\Delta\alpha = k_i / B_1 (I_2' / I_2 - 1)$. При этом величина k_i / B_1 в диапазоне $\alpha = 50 \div 130$ °эл., $\cos \varphi = 0,3 \div 0,9$ может быть с достаточной точностью вычислена как $k_i / B_1 = A_1 \lambda + A_0$, где $A_1 = 0,322\alpha^2 - 1,647\alpha + 1,949$; $A_0 = -1,748\alpha^2 + 8,560\alpha - 11,211$.

Практическая значимость работы заключается в разработанных на основании результатов исследований методиках и способах, внедренных в производство без доработки аппаратной части измерителей и регуляторов контактной сварки:

1. Предложен способ измерения сварочного тока [пат. РФ № 2424096], предусматривающий измерение тока со стороны первичной обмотки и длительности импульса тока со стороны вторичного витка сварочного трансформатора, последующие вычисления по эмпирической формуле. Способ позволяет повысить точность измерения сварочного тока со стороны первичной обмотки сварочного трансформатора.

2. Предложена методика измерения активной и индуктивной составляющих полного сопротивления контактных машин по результатам измерения вторичного тока и напряжения сети при включении машины в режиме короткого замыкания. Эта методика, погрешность которой обычно не превышает 5 %, может быть реализована с использованием стандартного измерительного оборудования. Предложены номограммы и аппроксимирующие зависимости, позволяющие автоматизировать измерение с использованием микропроцессорной техники.

3. Предложен способ определения сопротивления участка «электрод-электрод» [пат. РФ № 2424095], предусматривающий измерение угла открытия и

длительности включения тиристоров, сетевого напряжения и вторичного тока, последующие расчёты с использованием аппроксимирующей зависимости.

4. Разработан адаптивный алгоритм управления, позволяющий стабилизировать качество соединений в широком диапазоне действующих возмущений. В качестве задаваемых параметров режима используются опорные ток и сопротивление участка «электрод-электрод», полученные при сварке «эталонных» соединений, а коррекция алгоритма управления выполняется по результатам сравнения опорного и измеренного сопротивлений участка «электрод-электрод».

На защиту выносятся:

1. Результаты литературного обзора в области обеспечения качества сварных соединений при действии различных возмущений и анализа особенностей работы аппаратуры управления контактной сваркой в условиях массового производства.

2. Результаты экспериментальной проверки работы алгоритмов управления (программное задание угла открытия тиристоров, стабилизация тока во вторичном контуре, стабилизация напряжения и стабилизация энергии между электродами) при различных возмущениях (колебание напряжения сети, износ сварочных электродов и изменение усилия сжатия электродов), доказывающие высокую эффективность стабилизации тока при отработке большинства возмущений кроме износа сварочных электродов.

3. Полученные аппроксимирующие и графические зависимости, раскрывающие взаимосвязь продолжительности включения процесса сварки, геометрии и свойств материала электродов, использование которых при составлении технологии сварки позволяет повысить стойкость электродов.

4. Результаты лабораторных исследований и практического применения, подтверждающие эффективность предложенных методик диагностики оборудования и способов управления контактной сваркой при действии возмущений в условиях массового производства.

Достоверность результатов и выводов подтверждается использованием апробированных методов экспериментального исследования, инженерного анализа и обработки данных, современного поверенного оборудования, результатами опытной верификации полученных теоретических результатов.

Личный вклад соискателя заключается в непосредственном участии в исследовательской работе по теме диссертации на всех этапах, им лично выполнен литературный обзор по теме исследования, теоретические и экспериментальные исследования, обработка результатов и их обобщение, подготовлены доклады на научные конференции и семинары. Автором составлена методика измерения составляющих сопротивления многоэлектродных машин и осуществлено руководство экспериментальными замерами на машинах МСМ 503.618.421 и МСМ 503.651.421. С участием автора составлено техническое задание на программирование и осуществлялась доводка программного обеспечения для регулятора PST.6250.100L и системы компьютерного управления контактной сваркой СК-300. Диссидентом предложен оригинальный алгоритм управления током сварки, и проведена его апробация на промышленном оборудовании.

Апробация работы: основные положения работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры сварки ТГУ в 2008, 2009, 2012, 2019 и 2021 годах, 30 научно-технических конференциях, в том числе международных: «Актуальные вопросы промышленности и прикладных наук» (Ульяновск, 2004), «Достижения ученых ХХI века» (Тамбов, 2005), «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование» (Санкт-Петербург, 2007, 2008), «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2008), «Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского» (Тамбов, 2008, 2013), «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2009), «Автоматизированное проектирование в машиностроении» (Новокузнецк, 2014), «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации» (Тольятти, 2017).

Публикации: по теме диссертации опубликовано 20 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 статей в журналах, входящих в базу данных Scopus, получено 7 патентов РФ.

Структура и объём работы: диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе и заключения, списка литературы из 232 наименований и приложений. Диссертация представлена на 171 странице, содержит 98 рисунков и 23 таблицы. В приложениях приведены акты внедрения предложенных технологий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы.

В первой главе приведены данные по возмущениям (изменение свойств деталей, колебание напряжения питающей сети, изменение сопротивления вторичного контура сварочной машины, изменение условий сжатия деталей электродами, изменение условий протекания тока через свариваемые детали), влияющим на контактную сварку в автомобилестроении и вызываемым ими дефектам соединений на примере конкретных деталей кузова автомобиля. Установлено, что самым опасным возмущением следует признать изменение условий протекания тока через детали при износе сварочных электродов.

Выполнен обзор литературных источников, посвящённых управлению контактной сваркой. Из-за воздействия на контактную сварку перечисленных выше возмущений вместо программного задания параметров сварки приходится применять различные алгоритмы управления, предусматривающие измерение одного или нескольких параметров обратной связи и корректировку параметров режима в зависимости от реального протекания процесса сварки. Для построения обратной связи используют электрические (сварочный ток, падение напряжения на электродах, сопротивление между электродами) и обобщённые (тепловое расширение металла, температура свариваемых деталей, УЗ сигнал и акустическая эмиссия) параметры. Такое разнообразие объясняется тем, что не устранены недостатки и не разрешены трудности, сопровождающие измерение каждого из перечисленных параметров. Кроме того, между перечисленными параметрами и

качеством контактной сварки отсутствует прямая взаимосвязь, что делает невозможным построение универсального алгоритма управления с единым параметром обратной связи.

Ранее проведённые исследования в области управления контактной сваркой (диссертации Герасимова А.А. и Климова В.С.) показали, что количество измеряемых параметров при контактной сварке может быть уменьшено, если известны параметры самой сварочной машины (активное и индуктивное сопротивление в режиме короткого замыкания). В этом случае стабилизация тепловыделения обеспечивается по параметрам фазового регулирования (углы открытия и проводимости тиристоров в каждом периоде сварочного тока). Однако полученные закономерности не могут быть аппроксимированы с высокой точностью, что не позволяет использовать их при построении систем управления в массовом производстве. Кроме того, массовое производство характеризуется значительными колебаниями сетевого напряжения, сложностью измерения тока во вторичном контуре многоэлектродных машин, интенсивным износом токоведущих элементов и, как следствие, изменением параметров контактных машин.

Синтез управляющих алгоритмов для контактной сварки требует: адекватного описания электрических процессов (расчётное построение диаграмм электрических параметров в условиях фазового регулирования и возмущений), диагностики состояния контактных машин (измерение активного и индуктивного сопротивлений в режиме короткого замыкания, оценка износа элементов вторичного контура), разработки методик диагностики контактной сварки (измерение сопротивления участка «электрод-электрод», тепловыделения и т.д.).

Анализ состояния вопроса позволил сформулировать задачи диссертационной работы.

Во второй главе исследована эффективность различных алгоритмов управления контактной сваркой в условиях возмущений, предложена аппаратная реализация измерения тока в массовом производстве.

С использованием системы СК-300 реализована работа алгоритмов управления (программное задание угла α открытия тиристоров, стабилизация вторичного тока I_2 , напряжения U_{ϕ} и тепловыделения Q_{ϕ} между электродами) при сварке образцов из стали 08Ю толщиной 0,8+0,8 мм на машине МТПУ-300 в условиях действия возмущений (колебание напряжения U_c сети, износ сварочных электродов и изменение усилия F_{cb} сжатия электродов). После сварки образцы проходили испытания на срез на разрывной машине Н50КТ.

Подтверждено, что стабилизация сварочного тока, напряжения и тепловыделения между электродами компенсируют колебания питающей сети. Стабилизация напряжения и тепловыделения позволяют компенсировать износ сварочного электрода (Рисунок 1, а). При изменении усилия на электродах алгоритм со стабилизацией сварочного тока показал самую высокую стабильность качества сварки (Рисунок 1, б).

Таким образом, выбор эффективного алгоритма управления контактной сваркой должен выполняться с учётом характера и величины возмущения. Стабилизация тока позволяет компенсировать большинство возмущений, однако в

условиях износа электродов требует коррекции задаваемого значения сварочного тока.

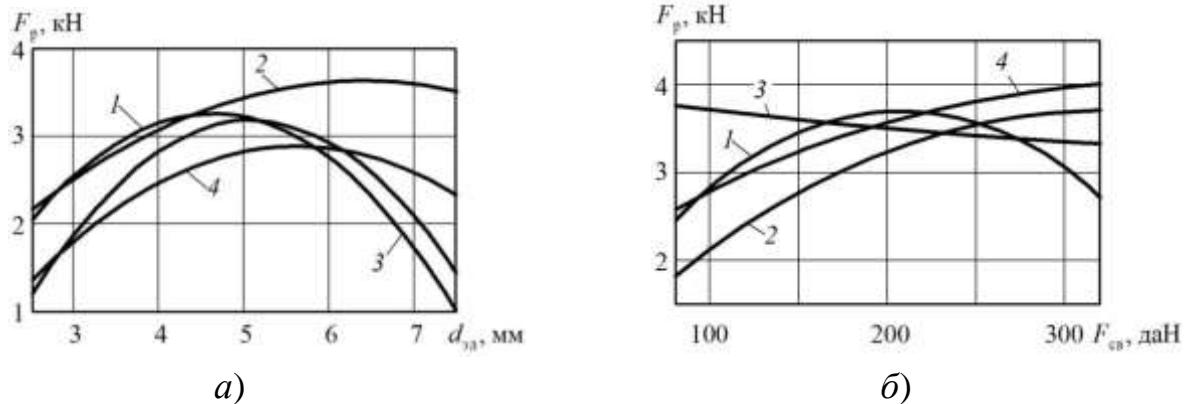


Рисунок 1. Зависимость прочности точек на срез от диаметра $d_{\text{эл}}$ электрода (а) и усилия $F_{\text{св}}$ на электродах (б) для образцов толщиной 0,8+0,8 мм при $\alpha = \text{const}$ (1); $U_{\text{ee}} = \text{const}$ (2); $I_2 = \text{const}$ (3); $Q_{\text{ee}} = \text{const}$ (4)

Исследование формирования ядра сварной точки в условиях долговременного износа электродов проводили на машине МТ-1933. Использовали образцы из стали 01ЮТ с горячецинковым покрытием, 08Ю без покрытия и 08Ю с электроцинковым покрытием толщиной пакетов 0,8+0,8 мм и 1,5+1,5 мм. Установлено, что сварка оцинкованных сталей толщиной 0,8 и 1,5 мм для компенсации износа электродов требует осуществления сложно-ступенчатого увеличения сварочного тока (Рисунок 2), выполненного по заранее определённой зависимости. При этом неправильный выбор параметров такого ступенчатого увеличения тока может привести к непровару.

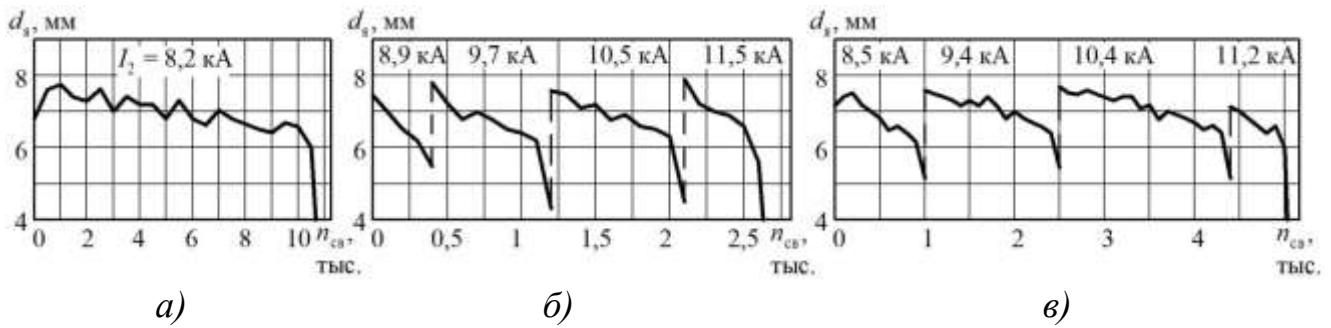


Рисунок 2. Диаметр ядра сварной точки при толщине образцов 1,5+1,5 мм из стали без покрытия (а), с горячецинковым (б) и электроцинковым (в) покрытием в зависимости от числа сварок $n_{\text{св}}$ и величины тока сварки I_2

Для разработки методики измерения сварочного тока контактную машину представили в виде Т-образной схемы замещения (Рисунок 3, а), в которой L_1 и r_1 – индуктивность и активное сопротивление первичной обмотки сварочного трансформатора, L_2' и r_2' – приведённые индуктивность и активное сопротивление вторичного витка сварочного трансформатора, L_{2k}' и r_{2k}' – приведённые индуктивность и активное сопротивление вторичного контура, r_{ee} – приведённое сопротивление участка «электрод-электрод», L_0 – индуктивность намагничивания.

При подаче на входы такой схемы первичного напряжения u_1 в ней возникают токи: первичный i_1 , ток намагничивания i_0 и приведённый вторичный ток i_2' , причём мгновенные значения тока i_2' определяются как разность токов i_1 и i_0 (Рисунок 3, δ).

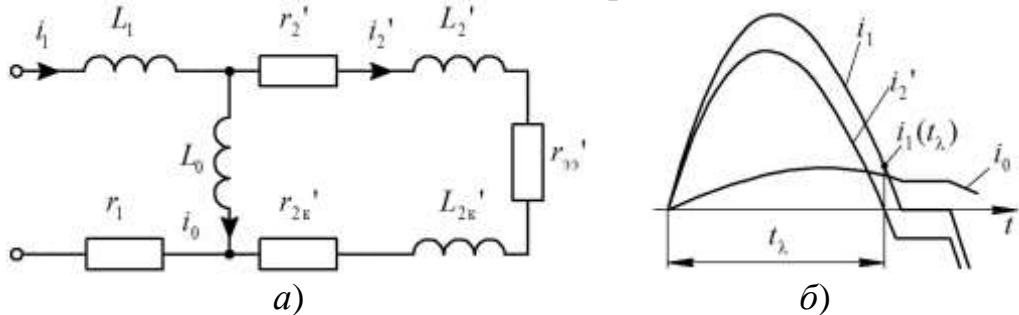


Рисунок 3. Т-образная схема замещения (a) контактной машины и диаграммы (δ) мгновенных значений первичного тока i_1 , тока намагничивания i_0 и приведённого к первичной обмотке трансформатора вторичного тока i_2'

Для учёта потерь в сварочном трансформаторе (насыщение сердечника и магнитные потери) предложена эмпирическая формула, позволяющая вычислять действующий вторичный ток I_2 по результатам измерения действующего тока I_1 со стороны первичной обмотки трансформатора:

$$I_2 = K \left[I_1 - i_1(t_\lambda) \frac{t_\lambda}{0,01} \right], \quad (1)$$

где K – коэффициент трансформации; t_λ – длительность импульса тока со стороны вторичного контура; $i_1(t_\lambda)$ – мгновенное значение первичного тока в момент времени t_λ .

Апробацию предлагаемого способа измерения тока выполняли с использованием опытного образца (Рисунок 4, a) при контактной точечной сварке деталей кузова автомобиля на многоэлектродных сварочных машинах, конструкция вторичного контура которых затрудняет оперативную установку датчика тока. Установлено, что погрешность измерения тока в этом случае не превышает 5 %.

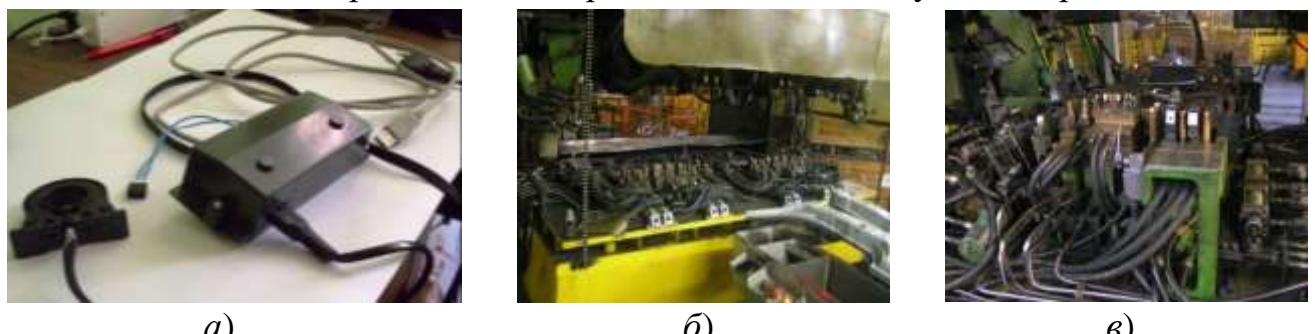


Рисунок 4. Узел измерителя сварочного тока и датчики тока (a), контур многоэлектродных сварочных машин (δ, ϵ)

В третьей главе предложена методика оперативного измерения активной и индуктивной составляющих полного сопротивления контактных машин, которая была апробирована на производственном оборудовании, предложен алгоритм управления контактной сваркой при действии возмущений.

Активное R_{2k} и индуктивное X_{2k} сопротивления машины в режиме короткого замыкания могут быть вычислены по известным формулам как:

$$R_{2k} = \frac{U_c}{K_t I_2} k_i \cos \varphi \quad (2) \quad \text{и} \quad X_{2k} = \frac{U_c}{K_t I_2} k_i \sin \varphi, \quad (3)$$

где K_t – коэффициент трансформации; U_c – напряжение питающей сети; I_2 – сила тока во вторичном контуре; k_i – коэффициент регулирования тока; φ – угол отставания тока от напряжения при полнофазном включении. В работе предложены регулировочные характеристики $k_i \cos \varphi$ и $k_i \sin \varphi$, значения которых заранее рассчитываются для возможных сочетаний углов открытия α и проводимости λ тиристоров (Рисунок 5).

Регулировочные характеристики $k_i \cos \varphi$ и $k_i \sin \varphi$ для $\alpha = 90^\circ$ эл. предложено аппроксимировать линейными двучленами:

$$k_i \cos \varphi = -0,497\lambda + 1,573 \quad (4) \quad \text{и} \quad k_i \sin \varphi = 0,642\lambda - 1,024, \quad (5)$$

которые могут быть использованы при построении систем микропроцессорного управления и диагностики контактной сварки и дают относительную погрешность аппроксимации, которая при $\cos \varphi = 0,2 \div 0,8$, не превышает 1,5%.

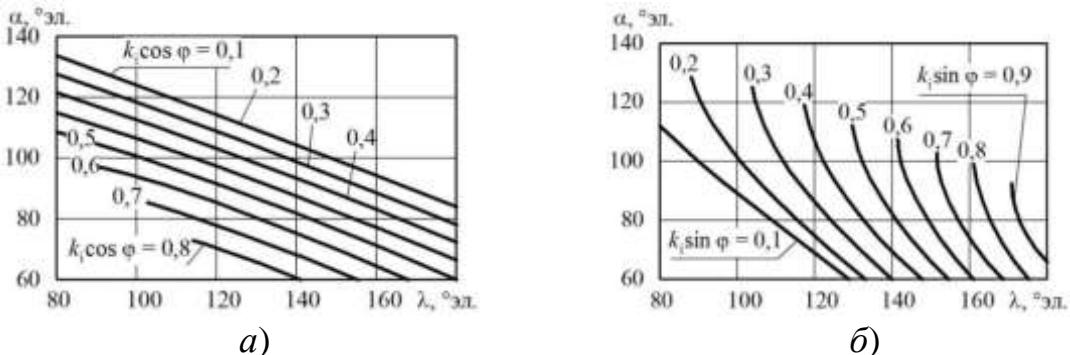


Рисунок 5. Номограммы определения регулировочных характеристик $k_i \cos \varphi$ (a) и $k_i \sin \varphi$ (б) для заданных значений α и λ

Построенные диаграммы относительных погрешностей расчета активного ωR (Рисунок 6, а) и индуктивного ωX (Рисунок 6, б) сопротивлений для погрешности измерения $\Delta \lambda = 0 \div 1^\circ$ эл. при угле открытия тиристоров $\alpha = 90^\circ$ эл. позволяют обоснованно задавать требуемую точность измерения проводимости λ тиристоров в зависимости от характеристик конкретных сварочных машин. Так, для машин МТПУ-300 ($\cos \varphi = 0,5$), МТ-2201 ($\cos \varphi = 0,5$) и МР-8010 ($\cos \varphi = 0,4$) приемлемая погрешность вычисления R_{2k} и X_{2k} , равная 3 %, достигается при $\Delta \lambda = 0,8^\circ$ эл. и $\alpha = 90^\circ$ эл.

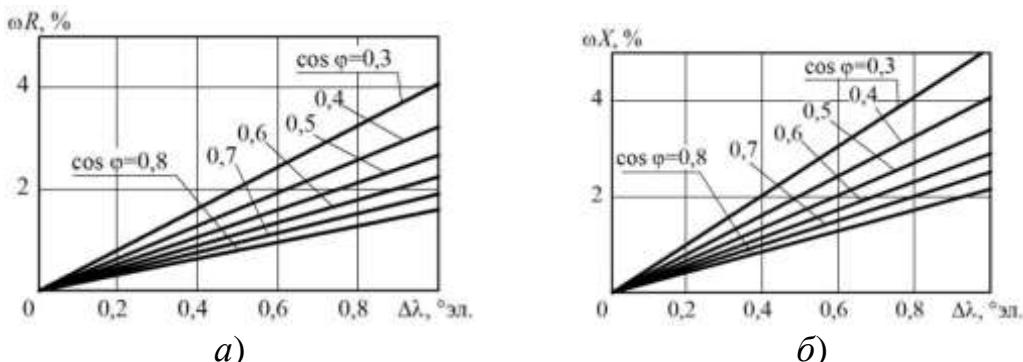


Рисунок 6. Относительные погрешности расчета активного ωR (а) и индуктивного ωX (б) сопротивлений при $\alpha = 90^\circ$ эл. и погрешности измерений $\Delta \lambda = 0 \div 1^\circ$ эл.

Включали в режиме короткого замыкания контактные сварочные машины МТПУ-300, МР-8010 и МТ-2201 с углами открытия тиристоров $\alpha = 60, 80, 100$ и 120 °эл. С использованием регистратора «МИКС-2М» измеряли действующее значение I_2 тока во вторичном контуре. По результатам измерений для каждой машины в системе координат $X_{2\kappa}-R_{2\kappa}$ численными методами строили графики $R_{2\kappa}=f(X_{2\kappa})$ (Рисунок 7). Для конкретной сварочной машины все графики $R_{2\kappa}=f(X_{2\kappa})$ пересекаются в одной узкой области, что позволяет оценивать величины $R_{2\kappa}$ и $X_{2\kappa}$. При этом функция $R_{2\kappa}=f(X_{2\kappa})$, может быть аппроксимирована как:

$$R_{2\kappa} = a_1 \cdot X_{2\kappa} + a_0. \quad (6)$$

Значение линейного коэффициента a_1 задают для каждого включения контактной машины в зависимости от выбранного угла α открытия тиристоров. Значение свободного члена a_0 задают для каждого включения в зависимости от выбранного угла α открытия тиристоров, сетевого напряжения U_c , коэффициента K_t трансформации и измеренного действующего значения I_2 вторичного тока:

$$a_1 = \begin{cases} -0,57 \text{ при } \alpha = 60 \text{ °эл.}; \\ -0,68 \text{ при } \alpha = 80 \text{ °эл.}; \\ -0,85 \text{ при } \alpha = 100 \text{ °эл.}; \\ -1,135 \text{ при } \alpha = 120 \text{ °эл.} \end{cases} \quad (7) \quad \text{и} \quad a_0 = \begin{cases} -29,1B^2 + 0,97B \text{ при } \alpha = 60 \text{ °эл.}; \\ -24,7B^2 + 0,85B \text{ при } \alpha = 80 \text{ °эл.}; \\ -18,2B^2 + 0,68B \text{ при } \alpha = 100 \text{ °эл.}; \\ -9,20B^2 + 0,48B \text{ при } \alpha = 120 \text{ °эл.}, \end{cases} \quad (8)$$

где $B=U_c/(I_2 K_t)$.

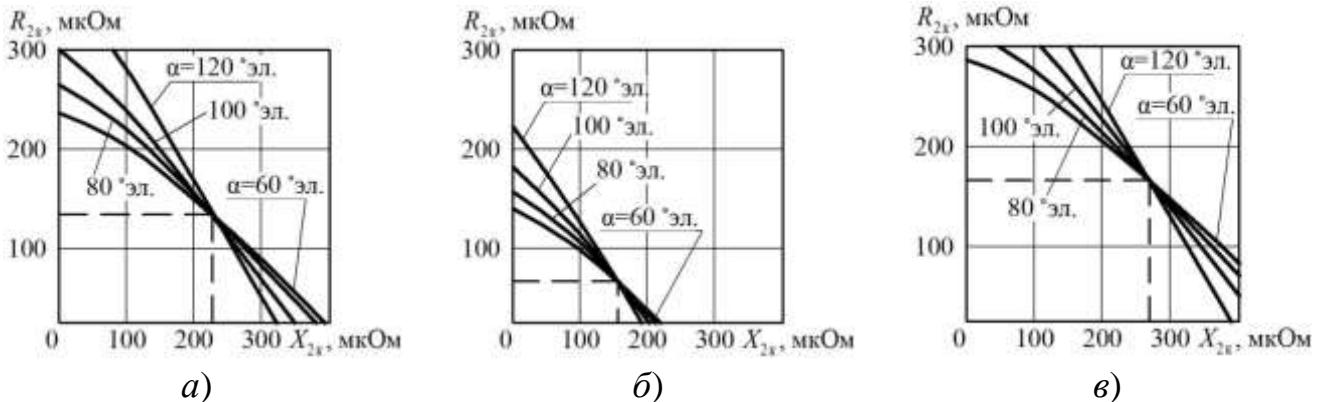


Рисунок 7. Графики $R_{2\kappa} = f(X_{2\kappa})$ для машин МТПУ-300 (а), МР-8010 (б), МТ-2201 (в) при $\alpha=60, 80, 100, 120$ °эл.

Таким образом, оценить величины $R_{2\kappa}$ и $X_{2\kappa}$ конкретной сварочной машины можно путём проведения опыта короткого замыкания при двух значениях угла открытия тиристоров $\alpha' \neq \alpha''$, измеряя в каждом случае действующие значения U_c сетевого напряжения и I_2 тока во вторичном контуре.

Отработку предлагаемой методики производили на многоэлектродной сварочной машине МСМ 503.618.421, установленной в цехе 1421 Сборочно-кузовного производства автомобилей на платформе Kalina. Как видно, для конкретной сварочной машины все графики $R_{2\kappa} = f(X_{2\kappa})$ пересекаются в достаточно узкой области, что позволяет найти искомые значения $R_{2\kappa}$ и $X_{2\kappa}$ (Рисунок 8). Для клещей 01 $R_{2\kappa} = 135$ мΩ, $X_{2\kappa} = 385$ мΩ; для клещей 02 $R_{2\kappa} = 143$ мΩ, $X_{2\kappa} = 365$ мΩ.

В течение 4 недель на машине МСМ 503.618.421 было сварено 30 тыс. деталей. После этого произвели повторный замер составляющих полного сопротивления вторичных контуров. При сравнительном анализе результатов первого и второго замеров зафиксировано повышение активного сопротивления R_{2k} вторичного контура клещей первой сварочной группы (клещи 02) со 143 мкОм до 199 мкОм. По результатам детального осмотра элементов вторичного контура причиной такого повышения сопротивления признан износ гибкого токоподвода.

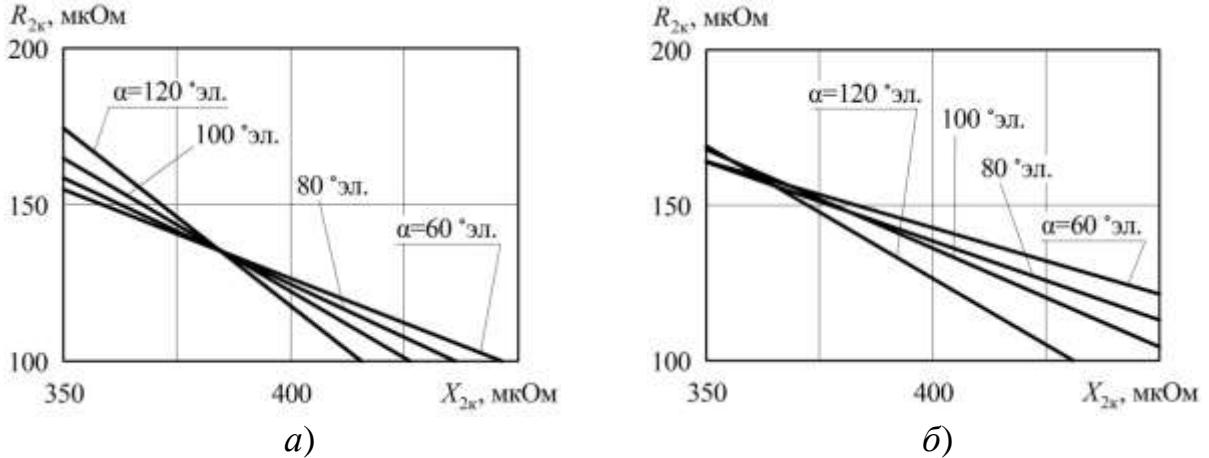


Рисунок 8. Графики $R_{2k} = f(X_{2k})$ для клещей 01 (а) и 02 (б) многоэлектродной машины МСМ 503.618.421

Регулировочную характеристику $k_i \cos\phi$ для известных углов открытия α и проводимости λ тиристоров предложено аппроксимировать как:

$$k_i \cos\phi = A_\lambda \lambda + A_\alpha \alpha + A_0, \quad (9)$$

где $A_\lambda = -0,45$, $A_\alpha = -0,94$ и $A_0 = 2,93$. При этом погрешность ω вычисления $k_i \cos\phi$ в диапазоне наиболее распространённых значений α и λ ($\alpha = 60\dots140^\circ$ эл., $\cos\phi = 0,4\dots0,8$) не превышает 5 %.

В адаптивном алгоритме управления значения I_2 и R_{ee} предложено заменить безразмерными относительными током τ_i и сопротивлением τ_R , вычисляемыми как:

$$\tau_i = I_2 / I_0, \quad \tau_R = R_{\text{ee}} / R_0, \quad (10)$$

где I_0 – опорный ток, обычно равный задаваемому току при сварке в отсутствии возмущений; R_0 – опорное сопротивление участка «электрод-электрод», равное сопротивлению участка «электрод-электрод» в конце процесса сварки. В этом случае действующее значение вторичного тока I_2 можно задавать в зависимости от значений I_0 и R_0 в заранее определённому закону $\tau_i = f(\tau_R)$. Например, для случая сварки образцов 0,8+0,8 мм из стали 08Ю в диапазоне $R_{\text{ee}} = 0,5\dots1,5R_0$ для $I_0 = 8$ кА и $R_0 = 100$ мкОм: при $\tau_i = 1$ будет реализован алгоритм стабилизации тока $I_2 = I_0 = 8$ кА; при $\tau_i = 1/\tau_R$ – алгоритм стабилизации напряжения на электродах $U_{\text{ee}} = I_0 R_0 = 0,8$ В.

Для стабилизации качества сварки при действии возмущений предложен комбинированный алгоритм управления:

$$\tau_i = k\tau_R + b, \quad \text{при } \tau_R \leq 1, \quad \tau_i = 1, \quad \text{при } \tau_R > 1, \quad (11)$$

где линейный коэффициент $k = -2\Delta_i$, свободный член $b = 1 + 2\Delta_i$, Δ_i – задаваемое приращение относительного тока при $\tau_R = 0,5$.

При реализации предложенного алгоритма управления сварочным током увеличение диаметра рабочей поверхности электродов вследствие износа будет компенсироваться пропорциональным увеличением тока сварки по закону, близкому к стабилизации тепловыделения на электродах. Увеличение же сопротивления $R_{\text{эз}}$ участка «электрод-электрод», возникающее при загрязнении поверхностей электродов и деталей, уменьшении сварочного усилия, будут отрабатываться регулятором по закону стабилизации тока.

Требуемый угол α' , обеспечивающий заданный ток I_2' в зависимости от измеренного тока I_2 и угла α в предыдущем периоде, рассчитывают как:

$$\alpha' = \alpha + k_i / B_1 (I_2' / I_2 - 1), \quad (12)$$

где k_i – коэффициент регулирования тока в предыдущем периоде; линейный коэффициент B_1 определяют как первую производную коэффициента k_i регулирования тока по α .

Отношение коэффициента регулирования k_i к линейному коэффициенту B_1 может быть вычислено по аппроксимирующему зависимости:

$$k_i / B_1 = A_1 \lambda + A_0, \quad (13)$$

где $A_0 = -1,748\alpha^2 + 8,560\alpha - 11,211$; $A_1 = 0,322\alpha^2 - 1,476\alpha + 1,949$.

Относительная погрешность вычисления по (13) обычно не превышает 10 % на области наиболее распространённых значений: $\alpha = 50 \div 130$ °эл., $\cos \varphi = 0,3 \div 0,9$, что позволяет рекомендовать её для построения систем микропроцессорного управления контактной сваркой.

Предлагаемый алгоритм управления устраняет влияние колебания напряжения U_c сети на прочность сварных соединений (Рисунок 9, *а*). При изменении усилия сжатия $F_{\text{св}}$ в достаточно широком диапазоне обеспечивается стабильное качество сварки (Рисунок 9, *б*). Увеличение диаметра $d_{\text{эл}}$ рабочей поверхности электродов относительно номинального диаметра ($d_{\text{эл}} = 4,6$ мм) при сварке с предлагаемым алгоритмом управления сопровождается незначительным уменьшением прочности сварных точек (Рисунок 9, *в*).

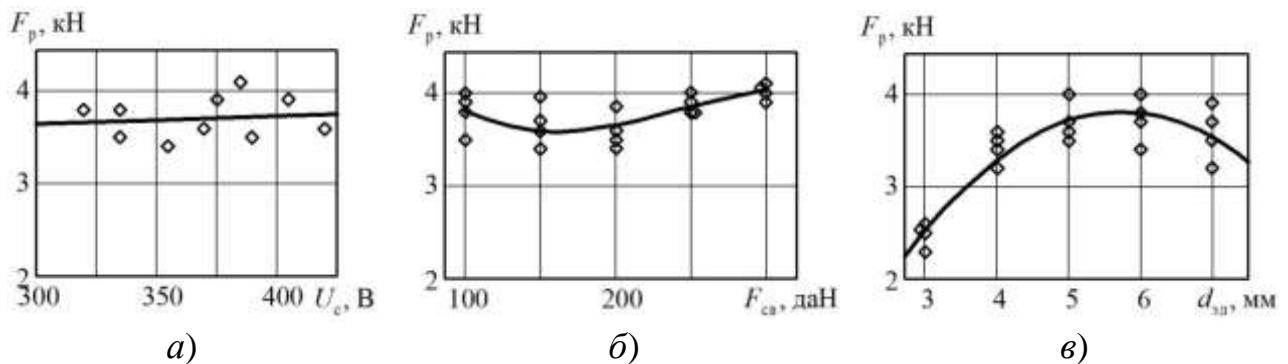


Рисунок 9. Прочность точек на срез при колебаниях напряжения сети U_c (*а*), давления $F_{\text{св}}$ на электродах (*б*) и диаметра $d_{\text{эл}}$ электрода (*в*) для образцов толщиной 0,8+0,8 мм при стабилизации сварки по предлагаемому алгоритму

В четвёртой главе приведены результаты апробации предлагаемых решений на промышленном оборудовании.

Первую серию опытов проводили на многоэлектродной машине МСМ 503.618.421 (Рисунок 10, *а*), предназначеннной для сварки усилителя внутренней панели задней двери правого в сборе 1118-6201180 (Рисунок 10, *б*) (свариваемые толщины 1,5+1,5 мм). Вторую серию опытов проводили на многоэлектродной машине МСМ 503.651.421 (Рисунок 10, *в*), предназначеннной для сварки наружной панели задней левой двери в сборе 1118-6201013 (Рисунок 10, *г*) (свариваемые толщины 0,8+0,8 мм).



Рисунок 10. Общий вид сварочных машин МСМ 503.618.421 (*а*) и МСМ 503.651.421 (*в*), свариваемые на них детали (*б* и *г*)

Измеряли диаметр ядра сварных точек при установке новых электродов и после выполнения каждого 100 сварок. Выявлено, что в условиях стабилизации сварочного тока обеспечивается получение соединения надлежащего качества до 500 сварок, после чего наблюдается существенное уменьшение диаметра ядра сварной точки и образование непроваров, что требует коррекции параметров режима сварки.

Начиная со сварки 501-й точки управление сваркой производили по предлагаемому алгоритму (9)...(11). При этом для первой детали задавали силу опорного тока $I_0 = 6,5$ кА, опорное сопротивление $R_0 = 116$ мкОм; для второй детали – $I_0 = 5,5$ кА, $R_0 = 127$ мкОм. Параметры режима сварки устанавливались и поддерживались при помощи регулятора PST.6250.100L (производства «BOSCH REXROTH»), для которого с использованием среды BOS 5000 и WinBlow были написаны служебные программы, позволяющие реализовать предложенные алгоритмы определения составляющих сопротивления вторичных контуров и управления током в условиях возмущений.

Реализуемый алгоритм управления предусматривает формирование диаграммы тока сварки в зависимости от сопротивления участка «электрод-электрод» (Рисунок 11), обеспечивающей получение соединения с заданным диаметром ядра. Исследования макрошлифов показали, что после выполнения 2000 точек диаметр ядра сварного соединения в обоих случаях не меньше заданного (Рисунок 12).

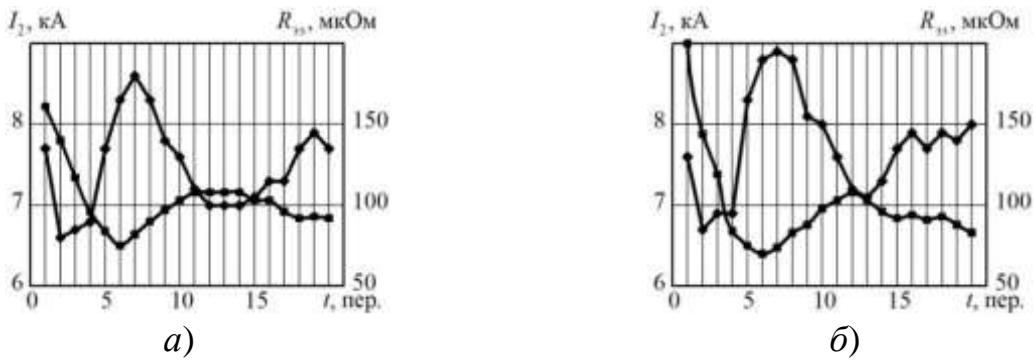


Рисунок 11. Сила вторичного тока I_2 (◊) и сопротивление R_{20} участка «электрод-электрод» (□) при сварке по предлагаемому алгоритму после выполнения 500 точек (а); после выполнения 2000 точек (б) (для толщины 1,5+1,5 мм)

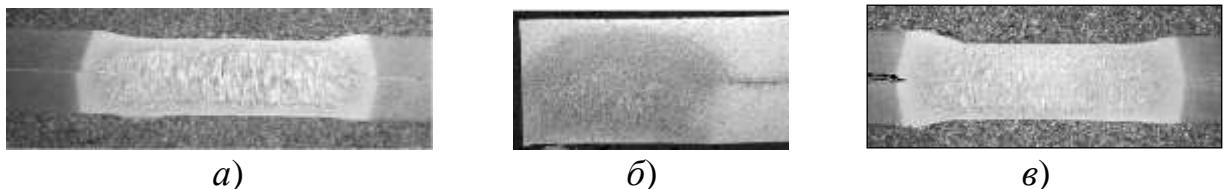


Рисунок 12. Макроструктура сварного соединения при отсутствии возмущений (а); после выполнения 500 точек при стабилизации тока (б); после выполнения 2000 точек по предложенному алгоритму управления (в) (для толщины 1,5+1,5 мм)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ

1. Наиболее опасными возмущениями при контактной сварке в массовом производстве являются износ электродов, колебание напряжения питающей сети и усилия сжатия, полная компенсация которых не обеспечивается современными техническими приёмами. Повышение эффективности управления контактной сваркой требует синтеза новых алгоритмов, основанных на адекватном описании электрических процессов и получении оперативной информации о состоянии сварочного оборудования.

2. Установлена и экспериментально доказана эффективность замкнутых систем управления, работающих по принципу регулирования тока во вторичном контуре, которые компенсируют такие возмущения, как колебание напряжения сети и усилия сжатия электродов. Для компенсации износа электродов в таких системах необходимо применение адаптивных алгоритмов, позволяющих корректировать задаваемое значение вторичного тока в зависимости от износа электродов.

3. Предложена методика, экспериментально доказана эффективность определения активной R_{2k} и индуктивной X_{2k} составляющих сопротивления контактных машин по результатам измерения тока при включении машины в режиме короткого замыкания с углами открытия тиристоров α' и α'' . Величины R_{2k} и X_{2k} находят как координаты точки пересечения изолиний, строящихся по результатам опыта краткого замыкания с использованием аппроксимирующих зависимостей. Этот способ, погрешность которого обычно не превышает 5 %, может быть реализован на контактных машинах с использованием стандартного измерителя сварочного тока. Предложены номограммы и аппроксимирующие зависимости, позволяющие автоматизировать измерение R_{2k} и X_{2k} с использованием микропроцессорной техники.

4. Предложены регулировочные характеристики $k_i \cos \varphi$ и $k_i \sin \varphi$, доказана эффективность их применения для расчётного определения активной R_{2k} и индуктивной X_{2k} составляющих сопротивления контактных машин. Предложенные характеристики для заданных углов α открытия тиристоров могут быть аппроксимированы линейными двучленами $k_i \cos \varphi = A_1 \lambda + A_0$ и $k_i \sin \varphi = B_1 \lambda + B_0$. Относительная погрешность аппроксимации при $\cos \varphi = 0,2 \div 0,8$ не превышает 1,5 % для $\alpha = 60 \dots 140$ °эл.

5. Доказана эффективность применения Т-образной схемы замещения контактной машины, при учёте свойств реального сварочного трансформатора (насыщение сердечника и магнитные потери). Установлено, что ток намагничивания может быть рассчитан по эмпирической зависимости как $i_1(t_\lambda) t_\lambda / 0,5T$ (где $i_1(t_\lambda)$ – мгновенное значение первичного тока в момент t_λ окончания импульса вторичного тока, $0,5T$ – половина периода сетевого напряжения).

6. Доказана эффективность применения регулировочной характеристики $k_i \cos \varphi$ для вычисления динамического сопротивления $R_{\text{вв}}$ участка «электрод-электрод» по измеренной длительности λ включения тиристоров и аппроксимирующему многочлену $k_i \cos \varphi = A_\lambda \lambda + A_\alpha \alpha + A_0$. Относительная погрешность определения сварочного сопротивления $R_{\text{вв}}$ в диапазонах $\cos \varphi = 0,4 \div 0,9$ и $\alpha = 60 \div 140$ °эл., не превышающая 5 %, достигается при $\Delta \lambda = 0,5$ °эл.

7. Предложена регулировочная характеристика k_i / B_1 , представляющая отношение коэффициента k_i регулирования тока к его первой производной B_1 по α , которая может быть аппроксимирована линейным двучленом $k_i / B_1 = A_1 \lambda + A_0$, где $A_1 = 0,322\alpha^2 - 1,476\alpha + 1,949$ и $A_0 = -1,748\alpha^2 + 8,560\alpha - 11,211$. Требуемый угол α' , обеспечивающий заданный ток I_2' в зависимости от измеренного тока I_2 и угла α в предыдущем периоде, рассчитывается как $\alpha' = \alpha + k_i / B_1 (I_2' / I_2 - 1)$.

8. Доказана эффективность в условиях широкого спектра возмущений адаптивного алгоритма управления, предусматривающего стабилизацию тока при увеличении сопротивления $R_{\text{вв}}$ относительно заданного и пропорциональное увеличение тока при снижении сопротивления $R_{\text{вв}}$ относительно заданного. Для этого режим контактной сварки задают опорным током I_0 и опорным сопротивлением R_0 участка «электрод-электрод», измеряемыми при отсутствии возмущений. Оценивают действующие возмущения по относительному сопротивлению $\tau_R = R_{\text{вв}} / R_0$, задают сварочный ток по относительному току $\tau_i = I_2 / I_0$, где $\tau_i = f(\tau_R)$. Для случая сварки низкоуглеродистых сталей толщиной 0,8+0,8 мм и 1,5+1,5 мм, эффективно использование $\tau_i = -\tau_R + 2$ при $\tau_R \leq 1$ и $\tau_i = 1$ при $\tau_R > 1$.

9. Предложенные методики были реализованы в АО «АВТОВАЗ» в регуляторах PST.6250.100L (производства «BOSCH REXROTH») на многоэлектродных машинах МСМ 503.618.421 (сварка усилителя внутренней панели задней двери модели 1118) и МСМ 503.651.421 (сварка панели наружной задней двери модели 1118). Внедрение способа измерения сопротивления позволило получить на каждой машине экономический эффект 36,7 тыс. рублей за счёт уменьшения трудоёмкости и простоты. Внедрение алгоритма управления позволило получить на первой машине экономический эффект 125 тыс. рублей, на второй –

276 тыс. рублей за счёт уменьшения доли разрушающего контроля и снижения трудозатрат на настройку оборудования.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Гладков Э.А., Климов А.С. Анциборов А.Н. Опыт применения регуляторов контактной сварки в массовом производстве // Сварка и Диагностика. 2021. № 1. С. 47-53 (0,75 п.л./0,25 п.л.).

2. Гладков Э.А., Анциборов А.Н., Климов А.С. Идентификация технологического процесса контактной сварки как объекта управления в условиях массового производства узлов кузова автомобиля // Сварка и Диагностика. 2020. № 6. С. 26-31 (0,75 п.л./0,25 п.л.).

3. Управление током при контактной сварке / А.Н. Анциборов [и др.] // Вестник машиностроения. 2019. № 6. С. 75-79 (0,58 п.л./0,15 п.л.).

4. Контроль состояния вторичных контуров контактных машин в условиях массового производства / А.Н. Анциборов [и др.] // Сварочное производство. 2019. № 6. С. 20-25 (0,66 п.л./0,16 п.л.).

5. Управление контактной сваркой в условиях возмущений / А.Н. Анциборов [и др.] // Сварочное производство. 2019. № 4. С. 43-45 (0,35 п.л./0,09 п.л.).

6. Способы измерения активного и реактивного сопротивлений сварочного контура контактных машин / А.Н. Анциборов [и др.] // Вестник машиностроения. 2019. № 3. С. 71-76 (0,69 п.л./0,17 п.л.).

7. Анциборов А.Н., Глухова Л.В., Митрофанова Я.С. Моделирование процессов контактной сварки: контроль и управление // Вестник ПВГУС. Серия экономика. 2018. № 1. С. 128-137 (1,15 п.л./0,38 п.л.).

8. Способ измерения тока при контактной сварке / А.Н. Анциборов [и др.] // Сварочное производство. 2012. № 10. С. 46-49 (0,42 п.л./0,1 п.л.).

9. Микропроцессорное управление контактной сваркой / А.Н. Анциборов [и др.] // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 9. С. 3-10 (0,85 п.л./0,21 п.л.).

10. Измерение составляющих полного сопротивления контактных сварочных машин / А.Н. Анциборов [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 3. С. 107-110 (0,46 п.л./0,12 п.л.).

11. Параметрическая стабилизация контактной сварки / А.Н. Анциборов [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 104-109 (0,69 п.л./0,17 п.л.).

12. Продолжительность включенного состояния тиристоров как параметр обратной связи в системах автоматического управления контактной точечной сваркой / А.Н. Анциборов [и др.] // Сварочное производство. 2009. № 2. С. 17-22 (0,54 п.л./0,14 п.л.).

13. Обеспечение качества контактной точечной сварки за счёт стабилизации вторичного тока при износе сварочных электродов / А.Н. Анциборов [и др.] // Сварочное производство. 2007. № 5. С. 10-13 (0,32 п.л./0,08 п.л.).

А так же в патентах РФ на изобретение: №№ 2311273, 2424095, 2424096, 2424097, 2424098, 2424099, 2457497.