

**Климов Алексей Сергеевич**

**Технологические приёмы и элементы теории адаптивного  
управления энергетическими параметрами контактной  
сварки в условиях возмущений**

Специальность: 2.5.8 – Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

доктора технических наук



Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тольяттинский государственный университет»

**Официальные оппоненты:** **Дубровский Владимир Анатольевич,**  
доктор технических наук, директор ООО «НПП  
«ВЕЛД»

**Латыпов Рашит Абдулхакович,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Оборудование и  
технологии сварочного производства»  
Московского политехнического университета

**Шолохов Михаил Александрович,**  
доктор технических наук, директор ООО  
«Шторм»

**Ведущая организация:** **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»**

Защита диссертации состоится 21 декабря 2023 г. в 14-30 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.331.20 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская д. 5., стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять в адрес диссертационного совета университета, а копии отзывов присылать по электронной почте: [dissovetmt@mail.ru](mailto:dissovetmt@mail.ru).

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук



А.С. Панкратов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Контактная сварка продолжает занимать лидирующее положение в массовом производстве (автомобилестроении, вагоностроении, судостроении). Основной её проблемой следует признать отсутствие надёжных методов контроля формирования литого ядра, проходящего под влиянием возмущений (колебание напряжения питающей сети, изменение активного и индуктивного сопротивлений вторичного контура, условия сжатия деталей электродами, условия протекания тока через свариваемые детали и его шунтирование).

Разработка высокопроизводительных режимов сварки и переход на сварку новых перспективных сталей и сплавов должны основываться на достоверной диагностике качества и максимальной компенсации действующих возмущений.

Вопросам повышения стабильности качества контактной сварки посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей (А.А. Чакалев, Ф.А. Аксельрод, Ю.Е. Иоффе, Б.Д. Орлов, П.Л. Чулошников, А.С. Гельман, Д.С. Балковец, К.А. Кочергин, В.С. Гавриш, М.П. Зайцев, А.П. Исаев, А.Л. Марченко, Н.В. Подола, П.М. Руденко, А.А. Урсатьев, Thomas.W. Eagar, H.S. Cho, K.I. Johnson, S.A. Gedeon, D.W. Dickinson и др.).

До настоящего времени не разрешены трудности, сопровождающие измерение энергетических параметров контактной сварки (ток сварки, напряжение на электродах, сопротивление участка «электрод-электрод», энерговыделение между электродами) и не предложено алгоритма, описывающего взаимосвязь этих параметров с прочностными показателями сварных соединений.

Существенное повышение качества достигнуто благодаря стабилизации и коррекции режимов сварки, реализуемых современными аппаратными средствами. В данной области ведут свои разработки известные производители оборудования для контактной сварки: ЗАО «Электрик-МИКС» (Россия), «Селма» (Россия), «Bosch Rexroth» (Германия), «ENTRON Controls» (США), «Welding Technology Corporation» (США), Spotron (Япония), «Dengensha» (Япония), Тесна (Италия).

Принятая большинством производителей аппаратуры концепция рассматривает регулятор контактной сварки как самостоятельное изделие, реализующее заранее заложенный в него управляющий алгоритм. В условиях массового производства нестабильность питающей сети, интенсивный износ сварочных электродов и токоведущих элементов контактных машин являются дестабилизирующими факторами, компенсация которых требует коррекции самого управляющего алгоритма.

Решение проблемы повышения стабильности качества контактной сварки при различных возмущениях может быть достигнуто путём комплексного решения задач оперативной диагностики состояния сварочного оборудования, моделирования электрических процессов в системе «машина-деталь», поиска параметров обратной связи, синтеза алгоритмов диагностики и управления.

**Цель работы** - повышение стабильности качества контактной сварки при различных возмущениях за счёт синтеза алгоритмов диагностики и управления энергетическими параметрами, корректируемых в зависимости от условий сварки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи исследования**:

1. Исследовать влияние неидеальности питающей сети на стабильность фазового регулирования и достоверность диагностики контактной сварки, предложить методику экспериментального определения паразитных параметров сети.

2. Разработать методики оперативной диагностики состояния контактных машин, обосновать требования к точности измерений, построить аппроксимирующие зависимости для автоматизации измерений.

3. На основании математического моделирования электрических процессов в системе «машина – деталь» предложить параметры обратной связи и методики расчётного определения энергетических параметров контактной сварки (ток сварки, сопротивление участка «электрод-электрод», энерговыделение между электродами).

4. Определить технологические возможности методов машинного обучения при прогнозировании качества соединений по результатам анализа электрических процессов в системе «машина-деталь».

5. Синтезировать алгоритмы адаптивного управления контактной сваркой, учитывающие состояние сварочного оборудования и питающей сети.

6. Исследовать эффективность предложенных алгоритмов в условиях действия различных возмущений на промышленных образцах оборудования при сварке низкоуглеродистых и высокопрочных сталей с защитным цинковым покрытием и без покрытия.

#### **Методы исследования и достоверность полученных результатов:**

Работа включает в себя совокупность теоретических, расчётных и экспериментальных методов исследований.

Моделирование электрических процессов в сварочном оборудовании выполнено согласно трёхконтурной схеме замещения, математическое описание выполнено методом переменных состояний, численное интегрирование выполнено методом Рунге-Кутты четвёртого порядка, реализация математической модели и анализ результатов вычислений проводился при помощи компьютерного моделирования.

Диагностика состояния сварочного оборудования, измерение сопротивления участка «электрод-электрод» и тепловыделения между электродами в условиях действия различных возмущений выполнялись по авторским методикам, основанным на фундаментальных физико-математических закономерностях.

Эксперименты и апробацию результатов исследования выполняли на универсальных машинах МТПУ-300 (лаборатория сварки ТГУ), МР-8010 («Салют-Фильтр»), МТ-1933 («Дальстройконструкция»), МТ-2201 («АВТОВАЗ»), специализированных многоэлектродных машинах МСМ 503.618.421 и МСМ 503.651.421 («АВТОВАЗ»). Для управления сварочным оборудованием использовались регуляторы контактной сварки РКМ-803 и РВИ-801 («Электрик-

МИКС», г. Санкт-Петербург), PST.6250.100L («BOSCH REXROTH»), PMC-24 (АО «АВТОВАЗ»), система компьютерного управления контактной сваркой СК-300 (авторская разработка). Для перепрограммирования регулятора PST.6250.100L применялась программная среда BOS 5000 и WinBlow.

Для фиксации параметров процесса сварки использовали многоканальный регистратор РКДП-0401 («МИЦ», г. Санкт-Петербург), анализатор сварки TE1600 («ТЕСНА», Италия), измеритель МИКС-2М («Электрик-МИКС», г. Санкт-Петербург), систему компьютерного управления СК-300 (авторская разработка).

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). Обработку экспериментальных данных выполняли в системе MathCAD методом наименьших квадратов.

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

**Научная новизна** заключается в разработке научно-обоснованных подходов к измерению энергетических параметров и управлению контактной сваркой, диагностике состояния сварочного оборудования и прогнозирования прочности соединений.

1. Развита представления о влиянии паразитных параметров питающей сети (активное сопротивление и индуктивность сети) на стабильность фазового регулирования и достоверность диагностики контактной сварки. Показано, что при параметрическом управлении током по напряжению сети влиянием паразитных параметров сети можно пренебречь. При численном поддержании вторичного тока развиваемый ток оказывается меньше задаваемого вследствие возникновения погрешности задания угла  $\alpha$  открытия тиристорov. Предлагаемая в работе методика позволяет измерить и учесть паразитные параметры сети при диагностике и управлении контактной сваркой.

2. Впервые для расчётного определения активного  $R_{2к}$  и индуктивного  $X_{2к}$  сопротивлений контактной машины предложены регулировочные характеристики  $k_i \cos \varphi$  и  $k_i \sin \varphi$ , которые для заданного угла открытия тиристорov  $\alpha = 90^\circ$ эл. могут быть аппроксимированы линейными двучленами  $k_i \cos \varphi = -0,497\lambda + 1,573$  и  $k_i \sin \varphi = 0,642\lambda - 1,024$ , на области  $\cos \varphi = 0,2 \div 0,8$  позволяющие вести расчёты с точностью 1,5 %.

3. Теоретически обоснована и практически подтверждена эффективность применения Т-образной схемы замещения контактной машины при расчётном определении энергетических параметров. При этом потери в сварочном трансформаторе могут быть оценены по мгновенному значению первичного тока в момент окончания импульса тока во вторичном контуре.

4. Теоретически обоснована и практически подтверждена эффективность расчётного определения энергетических параметров (ток сварки, напряжение на электродах, сопротивление участка «электрод-электрод», энерговыделение). С

учётом известных активного  $R_{2к}$  и индуктивного  $X_{2к}$  сопротивлений контактной машины в режиме короткого замыкания эти параметры могут быть вычислены по параметрам фазового регулирования (углы открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$  тиристоров). Погрешности расчётного определения: вторичного тока – 3 %, сопротивления участка «электрод-электрод» – 5 %, энерговыделения – 10 %.

5. Впервые предложена методика измерения активного сопротивления контактной машины в режиме короткого замыкания  $R_{2к}$  и динамического сопротивления участка «электрод-электрод»  $R_{ээ}$  с использованием новой регулировочной характеристики  $k_i \cos \varphi$ , где  $k_i$  – коэффициент регулирования тока. При известных углах открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$  тиристоров эта характеристика вычисляется как  $k_i \cos \varphi = -0,45\lambda - 0,94\alpha + 2,93$ . При этом погрешность определения  $R_{2к}$  и  $R_{ээ}$  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.

6. Впервые предложено характеризовать динамическое сопротивление и энерговыделение при контактной сварке с помощью обобщающего параметра –  $\operatorname{ctg} \varphi$ , где  $\varphi$  – угол отставания тока от напряжения при полнофазном включении. Коэффициент  $\operatorname{ctg} \varphi$  для известных значений  $\alpha$  и  $\lambda$  задаётся таблично или с точностью 8 % как  $\operatorname{ctg} \varphi = A_2\lambda^2 + A_1\lambda + A_0$ , где  $A_0 \dots A_2$  вычисляются по аппроксимирующим многочленам в зависимости от угла  $\alpha$ .

7. Практически подтверждена эффективность методов машинного обучения при прогнозировании прочности сварных соединений по результатам анализа изменения  $\operatorname{ctg} \varphi$  в процессе сварки. При этом синтез алгоритма диагностики представлен в виде задачи классификации, решённой с использованием нейронной сети Хемминга.

8. Теоретически обоснована и практически подтверждена эффективность управления током с использованием предложенной в работе регулировочной характеристики  $k_i/B_1$ , где  $k_i$  – коэффициент регулирования тока в зависимости от угла  $\alpha$ ;  $B_1$  – первая производная  $k_i$  по  $\alpha$ . При этом характеристика  $k_i/B_1$  для известных  $\alpha$  и  $\lambda$  вычисляется как  $k_i/B_1 = A_1\lambda + A_0$ , где коэффициенты  $A_1$  и  $A_0$  вычисляются в зависимости от  $\alpha$  по аппроксимирующим многочленам. Коррекцию угла  $\alpha$  открытия тиристоров, обеспечивающую заданный ток  $I_{2,зад}$  рассчитывают по результатам измерения тока  $I_2'$  в предыдущем периоде как  $(I_{2,зад}/I_2' - 1)k_i/B_1$ .

**Практическая значимость работы** заключается в апробированных и внедрённых в производство методиках диагностики и алгоритмах управления контактной сваркой, имеющих важное хозяйственное значение, внедрение которых повышает эффективность сварочных процессов.

1. Предложена методика расчётного определения паразитных параметров питающей сети по результатам опыта короткого замыкания в режиме полнофазного включения. До момента коммутации тиристорного контактора определяют действующее напряжение сети в режиме холостого хода; после коммутации – действующее напряжение сети под нагрузкой, первичный ток, угол отставания тока от напряжения; в момент коммутации – провал напряжения и

скорость нарастания первичного тока. Далее вычисляют индуктивность  $L_c$  и активное сопротивление  $R_c$  сети.

2. Предложена методика измерения активной  $R_{2к}$  и индуктивной  $X_{2к}$  составляющих полного сопротивления контактных машин на основе опыта короткого замыкания и измерения тока во вторичном контуре при двух различных углах открытия тиристорov. Для каждого угла строятся изолинии, являющиеся геометрическим местом точек, координаты которых соответствуют значениям активного и индуктивного сопротивлений, при которых развивается измеренный ток. Искомые значения сопротивлений находятся как координаты точки пересечения этих линий [пат. РФ № 2309030]. Предложенная методика, погрешность которой не превышает 5%, реализована на универсальном и специализированном сварочном оборудовании с использованием стандартных измерителей тока.

3. 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 и значительно упростить аппаратную часть. Сформулированы требования к аппаратным средствам реализации способа, представлены результаты испытаний опытного образца.

4. Предложен способ автоматического измерения и регулирования энерговыделения при контактной точечной сварке, в котором расчёт энерговыделения и угла открытия тиристорov в следующем периоде производят с использованием измеренной длительности включенного состояния тиристорov и заранее определённых параметров контактной машины [пат. РФ № 2311273], при этом возможен учёт ранее выделившейся за сварочный цикл энергии [пат. РФ № 2424097].

5. Предложен и внедрён на многоэлектродных сварочных машинах способ оценки сопротивления участка «электрод-электрод» [пат. РФ № 2424095], предусматривающий измерение угла открытия и длительности включения тиристорov, сетевого напряжения и вторичного тока, последующие расчёты с использованием аппроксимирующей зависимости.

6. Предложенные методики были реализованы в регуляторах PST.6250.100L (производства «BOSCH REXROTH») на многоэлектродных машинах MCM 503.618.421 (сварка усилителя внутренней панели задней двери модели 1118) и MCM 503.651.421 (сварка панели наружной задней двери модели 1118). Внедрение способа измерения сопротивления позволяет получить на каждой машине экономический эффект 36,7 тыс. рублей за счёт уменьшения трудоёмкости и простоя. Внедрение алгоритма управления током в условиях возмущений позволяет 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. Суммарный экономический эффект при внедрении в цехе 42-8 на 20 многоэлектродных машинах составляет 4,7 млн. рублей.

### **На защиту выносятся:**

1. Результаты обзора источников научно-технической информации в области диагностики и управления контактной сваркой в условиях действия различных возмущений.

2. Результаты теоретического и экспериментального исследований особенностей протекания электрических процессов в системе «машина-деталь», позволившие обосновать эффективность расчётного определения энергетических параметров (ток сварки, напряжение на электродах, сопротивление участка «электрод-электрод», тепловыделение между электродами) по результатам измерения со стороны первичной обмотки трансформатора.

3. Результаты теоретического и экспериментального исследования влияния паразитных параметров питающей сети (активное сопротивление и индуктивность) на стабильность фазового регулирования и достоверность диагностики контактной сварки. Методика экспериментального определения этих паразитных параметров.

4. Аппроксимирующие и графические зависимости, раскрывающие взаимосвязь параметров фазового управления с энергетическими характеристиками контактной сварки.

5. Результаты теоретического и экспериментального исследования эффективности расчётного определения активной и индуктивной составляющих полного сопротивления контактных машин по результатам опыта короткого замыкания.

6. Результаты теоретического и практического исследования эффективности прогнозирования качества сварки по результатам анализа протекания электрических процессов в системе «машина-деталь» методами искусственного интеллекта.

7. Алгоритмы управления контактной сваркой в условиях возмущений, использующих предложенные автором регулировочные характеристики и параметры обратной связи.

8. Результаты лабораторных исследований и практического применения, подтверждающие эффективность предложенных методик диагностики и алгоритмов управления контактной сваркой при различных возмущениях.

**Личный вклад соискателя** заключается в непосредственном участии в получении исходных данных и научных экспериментах на всех этапах работы, подготовлены публикации и сделаны доклады на конференциях и семинарах. Литературный обзор по теме исследования лёг в основу монографии («Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества», 2011 г., издана при поддержке фонда РФФИ) и учебного пособия («Основы технологии и построения оборудования для контактной сварки», 2018 г., издано при поддержке ф. «TECNA», Италия). Автором подготовлены исходные данные и условия для моделирования электрических процессов в сварочном оборудовании при колебаниях в питающей сети, изучены особенности диагностики и фазового регулирования при контактной сварке в зависимости от паразитных параметров сети. Предложены методики измерения составляющих полного сопротивления контактных машин, которые были апробированы лично автором на

универсальных машинах (МТПУ-300, МР-8010, МТ-1933). Получены аппроксимирующие зависимости для вычисления коэффициента мощности  $\cos\varphi$ , коэффициента регулирования тока  $k_i$ , предложенных регулировочных характеристик  $k_i \cdot \cos\varphi$ ,  $k_i \cdot \sin\varphi$  и  $\operatorname{ctg}\varphi$  в зависимости от параметров фазового регулирования (углов открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$ ).

Под руководством автора выполнена апробация и внедрение методик измерения составляющих сопротивления на универсальной машине МТ-2201, специализированных машинах МСМ 503.618.421 и МСМ 503.651.421 (АО «АВТОВАЗ»). Составлено техническое задание и выполнялись работы по программированию и доводке программного обеспечения для регулятора PST.6250.100L и системы компьютерного управления контактной сваркой СК-300. Предложен оригинальный алгоритм управления током сварки в зависимости от состояния сварочных электродов, и проведена его апробация на промышленном оборудовании.

Автором предложены оригинальные методики диагностики контактной сварки: параметрического определения и стабилизации сварочного тока, расчётного определения сопротивления участка «электрод-электрод», расчётного определения и стабилизации тепловыделения между электродами.

Под руководством автора разработана методика прогнозирования прочности сварных точек на основании анализа параметров фазового регулирования (углов открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$ ) методами искусственного интеллекта. Полученные лично автором и под его руководством материалы использованы при подготовке трёх кандидатских диссертаций, выполнении гранта РФФИ № 15-08-03125.

**Апробация работы:** основные положения работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры сварки ТГУ, 40 научно-технических конференциях, в том числе международных: «Актуальные вопросы промышленности и прикладных наук» (Ульяновск, 2004), «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование» (Санкт-Петербург, 2005, 2007, 2008) «Достижения ученых XXI века» (Тамбов, 2005), «Технологические информационные системы в инжиниринге продукции и техническом образовании» (Люблин, 2006), «Автоматизация технологических процессов и производственный контроль» (Тольятти, 2006), «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного производства, технология и надёжность машин, приборов и оборудования» (Вологда, 2007), «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2008), «Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского» (Тамбов, 2008, 2013), «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2009), «Достижения высшей школы» (София, 2013), а также семинарах кафедры сварки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2019, 2020).

**Публикации:** по материалам исследований опубликовано 94 работы, в том числе 2 монографии (грант РФФИ 10-08-07033), 25 статей в журналах из списка ВАК, 10 статей в иностранных журналах из базы данных Scopus, получено 10 патентов РФ на изобретение.

**Структура и объём работы:** диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов по работе, списка литературы из 472 наименований и приложений (акты внедрения предложенных технологий). Диссертация представлена на 356 страницах, содержит 200 рисунков и 32 таблицы. В приложениях приведены акты внедрения предложенных технологий.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы.

**В первой главе** выполнен анализ возмущений при контактной сварке (нестабильность питающей сети, изменение сопротивления вторичного контура контактной машины, изменение условий сжатия деталей электродами, износ сварочных электродов, шунтирование тока), которые в массовом производстве снижают стабильность качества. Приведены примеры деталей автомобиля, с характерными дефектами и анализ причин их возникновения. Показана особая опасность дефектов сварки, проявляющихся после выпуска автомобиля (рис. 1), могущих стать причинами травм при возникновении внештатных ситуаций, серьёзных финансовых и репутационных издержек.

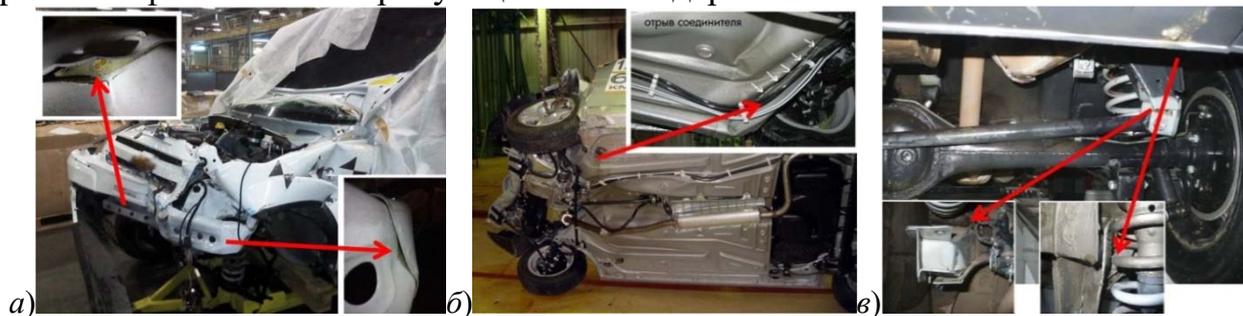


Рисунок 1. Дефекты контактной сварки кузова автомобиля: непровар передней балки и балки бампера (а); непровар лонжерона переднего (б); непровар кронштейна поперечной тяги (в)

На основании анализа литературных данных и проведённых исследованиях на предприятиях Самарской области обозначены основные проблемы обеспечения качества контактной сварки в условиях массового производства:

1) колебание напряжения питающей сети; 2) износ сварочных электродов и практическая невозможность их зачистки и замены в течение смены; 3) нестабильность сварочного усилия; 4) интенсивный износ элементов вторичного контура и, как следствие, существенное изменение электрических параметров сварочного оборудования, что усугубляется высокой трудоёмкостью проведения измерений и необходимостью вывода оборудования из технологического цикла; 5) проблемы размещения и большое число датчиков тока при их установке во вторичном контуре многоэлектродных машин.

Выполнен литературный обзор источников, посвящённых оценке качества контактной сварки с использованием различных диагностических признаков (ток во вторичном контуре, падение напряжения на сварочных электродах, сопротивление участка «электрод-электрод», сигналы акустической эмиссии, тепловое расширение металла, температурная обстановка в зоне сварки).

Наибольшее распространение получили методы диагностики с использованием энергетических характеристик процесса (ток во вторичном контуре, падение напряжения на сварочных электродах, сопротивление участка «электрод-электрод» и тепловыделение на этом участке). Наибольшее распространение получили стабилизирующие системы по электрическим параметрам: току сварки, падению напряжения и энерговыделению между электродами. Также распространение получили корректирующие системы, работающие по напряжению питающей сети, по прогнозируемому износу сварочного электрода, по сопротивлению участка «электрод-электрод».

Следует признать, что ни одна из существующих систем управления не обладает достаточной эффективностью, что заставляет усложнять аппаратную часть (в том числе и за счёт увеличения числа измеряемых параметров), применять методики постоперационного контроля качества (в том числе и с разрушением значительного числа годных изделий) и увеличивать количество сварных точек на кузове автомобиля.

В существующих системах управления контактной сваркой основной упор делается на связь качества и электрических параметров процесса, измерение которых, в свою очередь, требует сложного оборудования и сопряжено при контактной сварке с наличием значительных помех. Упрощение аппаратуры управления и повышение помехозащищённости измерений может быть получено при уменьшении количества измеряемых параметров. При этом необходимо решить проблему адекватного описания электрических процессов, протекающих в системе «машина – деталь» при контактной сварке. Получившая в настоящее время широкое распространение схема замещения и алгоритм расчёта переходного процесса при работе тиристорного контактора не позволяют этого сделать. Кроме того, входными параметрами для такой электрической модели являются активное и индуктивное сопротивления машины в режиме короткого замыкания, для которых в настоящий момент не существует принятой методики оперативного измерения или вычисления с приемлемой для научных исследований или практической реализации точностью.

Диагностика и управление контактной сваркой с использованием методов искусственного интеллекта позволяет задавать критерии качества, взаимосвязь численных значений которых с измеряемыми параметрами сварки не имеет алгоритмического описания. Необходимость одновременного измерения нескольких параметров сварки для достижения приемлемой точности, трудоёмкость обучения и высокая вероятность катастрофической потери точности при отклонении условий сварки от заданных существенно ограничивают применение систем искусственного интеллекта.

Проблема повышения стабильности качества контактной сварки в условиях действия возмущений может быть решена на основе комплексного решения задач по моделированию электрических процессов в системе «машина-деталь», оперативной диагностики состояния сварочного оборудования и процесса сварки, поиска параметров обратной связи для построения систем управления и диагностики, совершенствования алгоритмов управления с применением методов искусственного интеллекта.

Анализ состояния вопроса позволил сформулировать задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** с использованием моделирования электрических процессов в системе «машина – деталь» научно обоснована эффективность расчётного определения энергетических параметров (ток сварки, напряжение на электродах, сопротивление участка «электрод-электрод», тепловыделение между электродами) по результатам измерения со стороны первичной обмотки трансформатора. Исследовано влияние паразитных параметров питающей сети (активное сопротивление и индуктивность) на стабильность фазового регулирования и достоверность диагностики контактной сварки.

Моделирование реального двухобмоточного трансформатора выполнено с применением трехконтурной схемы замещения (рис. 2), где  $R_{1T}$ ,  $L_{1T}$ ;  $R_{2T}$ ,  $L_{2T}$ ;  $R_{\mu}$ ,  $L_{\mu}$  – активные сопротивления и индуктивности рассеяния первичной обмотки, вторичного витка и сердечника. Индуктивность  $L_{\mu}$  численно равна магнитной проводимости сердечника, которая в свою очередь зависит от степени магнитного насыщения его материала. Резистор  $R_{\mu}$  моделирует потери на гистерезис и вихревые токи в сердечнике. Трансформаторы  $T_1$  и  $T_2$  здесь идеальные, у каждого одна из обмоток одновитковая, а вторая имеет число витков, соответствующее реальным обмоткам:  $n_1$  – первичной,  $n_2$  – вторичной. Применяя эквивалентные преобразования, трансформаторы  $T_1$  и  $T_2$  могут быть исключены, а схема приведена к T-образной.

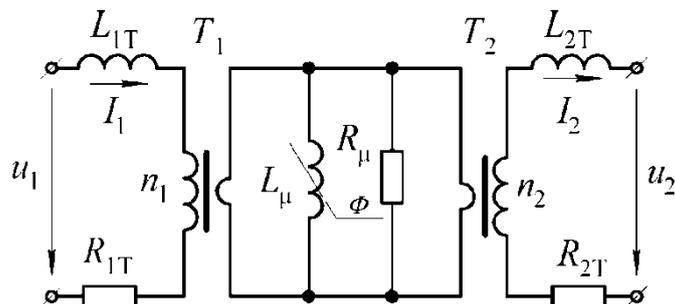


Рисунок 2. Принимаемая схема замещения двухобмоточного трансформатора

Тиристорный контактор во включенном состоянии заменяется переключателем, а в выключенном – разрывом электрической цепи. Таким образом, были получены две схемы замещения (рис. 3): для включенного (а) и для выключенного (б) состояния тиристорного контактора. Поскольку контроль сварочного процесса осуществляется со стороны первичной цепи, использована T-образная схема замещения трансформатора с приведением параметров к первичной обмотке.

В качестве метода математического описания был выбран метод переменных состояния, позволяющий получить математическую модель в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка. Изменение состояния тиристорного контактора (от выключенного состояния к включенному состоянию и обратно) принято происходящим мгновенно, соответственно переключение между схемами замещения (рис. 3, а и рис. 3, б) реализованы методом припасовывания, посредством передачи начальных условий для численного интегрирования. В предлагаемых схемах  $E(t)$  – мгновенное значение напряжения

питающей сети;  $R_1$  – сумма активного сопротивления первичной обмотки трансформатора и внутреннего сопротивления сети;  $L_1$  – сумма индуктивности рассеяния первичной обмотки и внутренней индуктивности сети;  $L_2$  – приведенная к первичной обмотке сумма индуктивности рассеяния вторичной обмотки трансформатора и индуктивности вторичного контура;  $R_2$  – приведенная сумма активного сопротивления вторичной обмотки и вторичной цепи;  $R_3(t)$  – приведённое сопротивление участка «электрод-электрод».

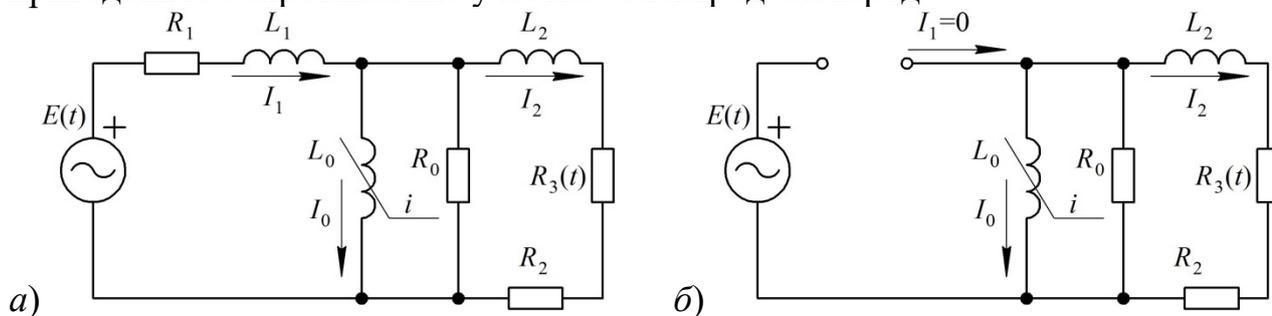


Рисунок 3. Расчетная схема замещения контактной сварочной машины для включенного (а) и для выключенного (б) состояния тиристорного контактора

Оценку влияния сварочного трансформатора на погрешность определения энергетических характеристик (сварочного тока, энерговыделения, сопротивления участка «электрод-электрод») при измерениях со стороны первичной обмотки выполняли с использованием поправочного коэффициента  $K_1$ :  $K_1 = I_1 / I_2'$ , где  $I_1$  – измеренный ток со стороны первичной обмотки сварочного трансформатора;  $I_2'$  – приведённый вторичный ток. На рисунке 4 представлены расчетные зависимости поправочного коэффициента  $K_1$  от угла регулирования  $\alpha$  при различных значениях коэффициента мощности машины в диапазоне  $\cos \varphi = 0,6 \dots 0,9$  для машины стационарной МТПУ-300 (рис. 4, а), подвесных клещей МТП-1110 (рис. 4, б) и многоэлектродной машины МСМ 503.618.421 (рис. 4, в).

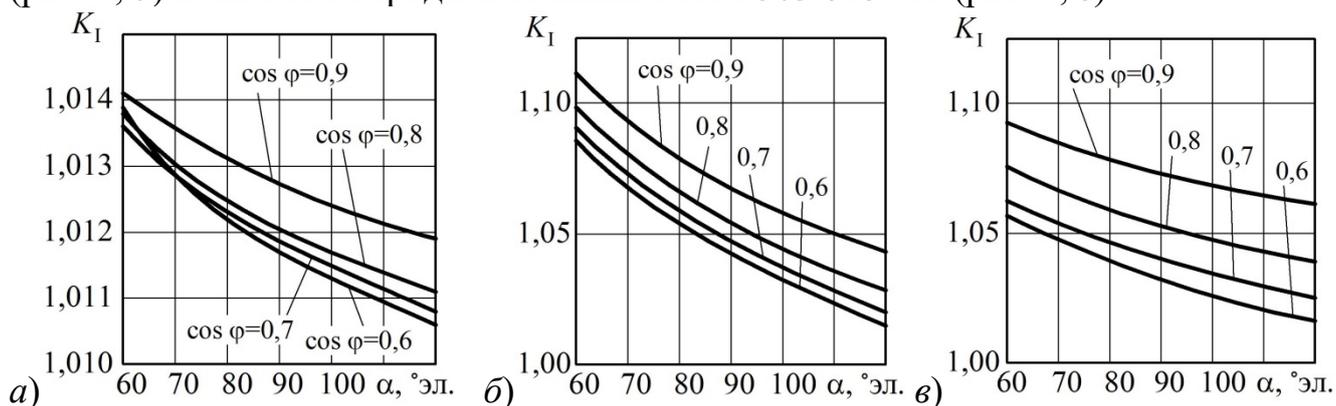


Рисунок 4. Коэффициент уменьшения тока  $K_1$  для машины МТПУ-300 (а), подвесной машины МТП-1110 (б) и многоэлектродной машины МСМ 503.618.421 (в)

Погрешность, вносимая трансформатором в измерение энергетических характеристик со стороны первичной обмотки, на универсальных машинах составляет порядка 2 %. С учётом дальнейшего совершенствования выпускаемого

сварочного оборудования магнитными потерями в трансформаторе при электротехнических расчётах можно пренебречь.

Однако при сварке на подвесных сварочных клещах, многоэлектродных машинах, а также длительно используемом оборудовании, магнитные потери и, следовательно, методическая погрешность увеличиваются и должны быть учтены.

При включении контактной машины в режиме сварки приведённый вторичный ток  $i_2'$  определяется как разность первичного тока  $i_1$  и тока намагничивания  $i_0$  (рис. 5, а). Непосредственное измерение приведённого вторичного тока  $i_2'$  невозможно, а оценка его величины по результатам измерения первичного тока  $i_1$  затруднено вследствие погрешности, вносимой током намагничивания  $i_0$ .

Для расчётного определения действующего значения вторичного тока предложена эмпирическая формула:

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

где  $I_1$  и  $I_2$  – действующие значения первичного и вторичного токов;  $i_1(t_\lambda)$  – измеренное мгновенное значение первичного тока в момент времени  $t_\lambda$ ;  $t_\lambda$  – время смены знака вторичного тока.

Оценку промышленной применимости предлагаемого способа измерения сварочного тока производили с использованием опытного образца (рис. 5, б) в АО «АВТОВАЗ» при контактной точечной сварке деталей кузова автомобиля с использованием многоэлектродных сварочных машин (рис. 5, в), конструкция вторичного контура которых затрудняет оперативную установку датчика тока.



Рисунок 5. Диаграммы мгновенных значений токов при контактной сварке (а), измеритель сварочного тока (б) и контур многоэлектродной сварочной машины (в)

Параметры питающей сети (активное сопротивление  $R_c$  и индуктивность  $L_c$  сети) оказывают влияние на работу контактной сварочной машины, снижая подаваемое на первичную обмотку трансформатора фактическое напряжение сети  $U_1$  по сравнению с напряжением  $U_{c,xx}$  на холостом ходу. Кроме того, наблюдаемый на осциллограммах тока и напряжения угол открытия тиристоров  $\alpha$  (отсчитывается от сигнала напряжения в сети  $u_c$  под нагрузкой) может отличаться от фактического угла  $\alpha'$  (отсчитывается от напряжения в сети  $u_{c,xx}$  на холостом ходу) до  $3^\circ$ эл., что приводит к погрешностям расчётного определения и управления энергетическими параметрами (рис. 6, а). Уменьшение коэффициента мощности машины в режиме сварки ( $\cos\varphi < 0,8$ ) и глубины фазового регулирования ( $\alpha < 100^\circ$ эл.), а также повышение мощности загрузки сварочной

машины (более 65 кВА) приводят к увеличению этой погрешности. Решение вопроса об учете погрешности наблюдения следует принимать по результатам измерения паразитных параметров сети и вычисления наибольшей ошибки наблюдения с учётом загрузки.

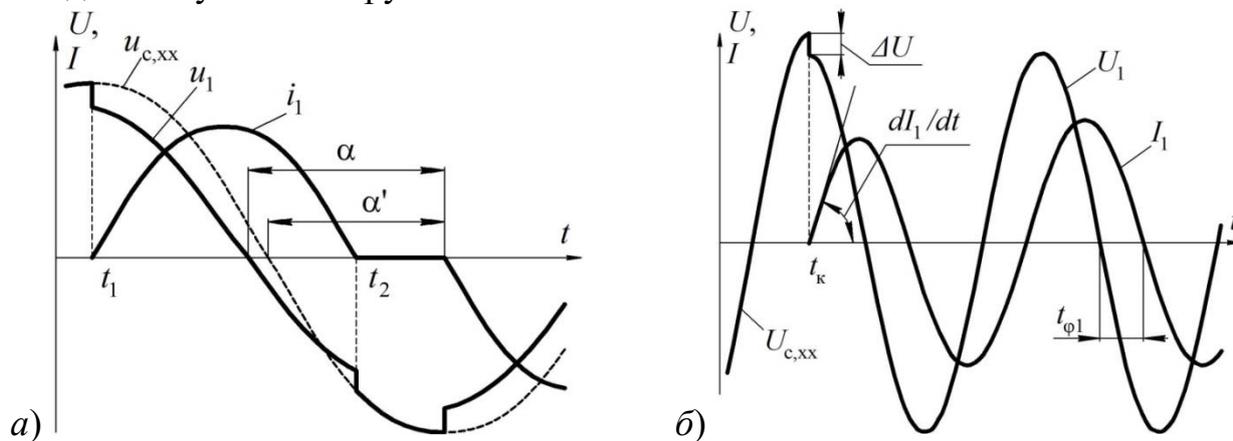


Рисунок 6. Возникновение ошибки угла регулирования (а) и измерения при расчётном определении паразитных параметров сети (б)

Паразитные параметры сети предложено вычислять по результатам кратковременного полнофазного включения машины в режиме короткого замыкания и измерения (рис. 6, б): напряжения сети  $U_{c,xx}$  до момента коммутации, первичного напряжения  $U_1$  после коммутации, первичного тока  $I_1$ , сдвига  $t_{\phi 1}$  между кривыми  $I_1$  и  $U_1$ , провала напряжения  $\Delta U$  в момент коммутации, скорости  $dI_1/dt$  нарастания первичного тока в момент коммутации.

**В третьей главе** с использованием математического и физического моделирования электрических процессов в системе «контактная машина – деталь» обоснованы и апробированы методики диагностики контактной сварки: расчётное определение энергетических характеристик (ток сварки, сопротивление участка «электрод-электрод», тепловыделение между электродами), прогнозирование прочности соединений методами искусственного интеллекта.

Входными параметрами моделирования являются: сетевое напряжение  $U_c$ ; активное  $R_{2к}$  и индуктивное  $X_{2к}$  сопротивления контактной машины в режиме короткого замыкания; сопротивление  $R_{ээ}$  участка «электрод-электрод» (ориентировочные значения могут быть взяты по литературным источникам или определены экспериментально); коэффициент  $K_T$  трансформации на данной ступени трансформатора; угол  $\alpha$  открытия тиристорov.

Для конкретной контактной машины могут быть рассчитаны действующие значения вторичного тока в режиме короткого замыкания при различных параметрах фазового регулирования (угол открытия тиристорov  $\alpha$  и коэффициент трансформации  $K_T$ ) (рис. 7), а также нагрузочные характеристики (величина вторичного тока  $I_2$  в зависимости от сопротивления  $R_{ээ}$  участка «электрод-электрод» и угла фазового регулирования  $\alpha$ ) (рис. 8).

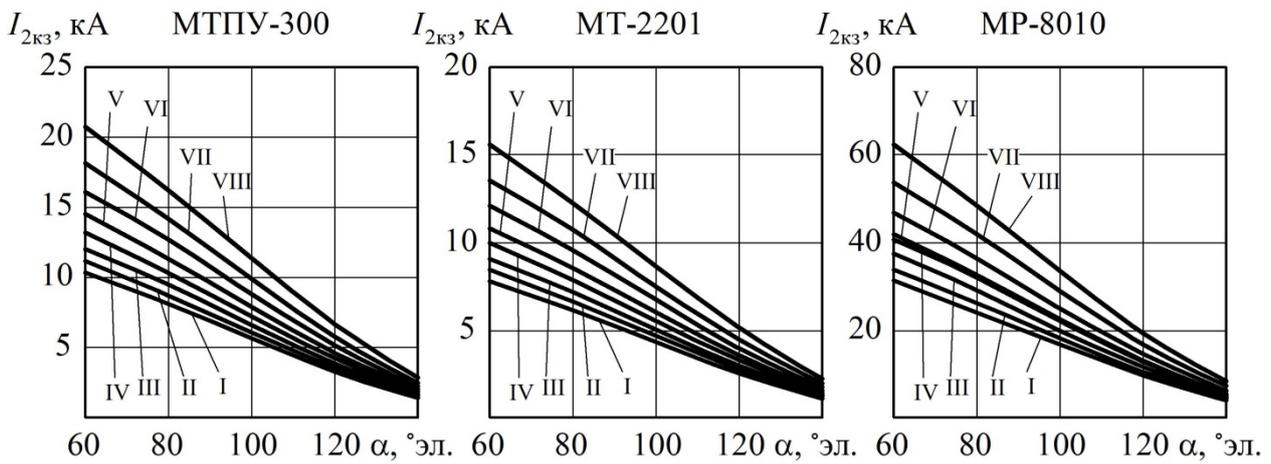


Рисунок 7. Расчётный вторичный ток в режиме короткого замыкания при  $U_c=380$  В для контактных машин МТПУ-300, МТ-2201, МР-8010

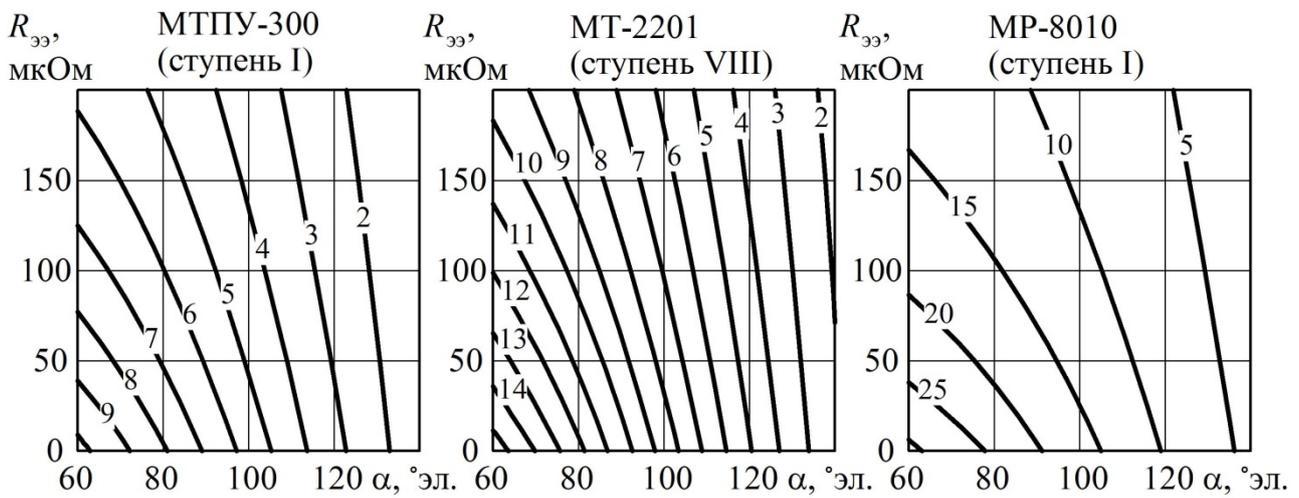


Рисунок 8. Расчётный вторичный ток  $I_2$  (кА) при  $U_c=380$  В и различной нагрузке  $R_{эз}$  для контактных машин МТПУ-300, МТ-2201, МР-8010

Величину коэффициента регулирования тока (отношение вторичного тока к однофазному:  $k_i=I_2/I_{2п}$ ) предложено рассчитывать для заданного угла открытия тиристоров  $\alpha$  при известном коэффициенте мощности  $\cos\varphi$  (рис. 9, а) или измеренной длительности  $\lambda$  включения тиристоров (рис. 9, б) как:

$$\begin{cases} k_i = B_1 \cdot \alpha + B_0 \\ B_1 = -0,519 \cdot \cos^2 \varphi + 1,086 \cdot \cos \varphi - 1,076, \\ B_0 = 1,337 \cdot \cos^2 \varphi - 2,587 \cdot \cos \varphi + 2,667 \end{cases} \quad \begin{cases} k_i = B_2 \cdot \lambda^2 + B_1 \cdot \lambda + B_0 \\ B_2 = -0,066 \cdot \alpha^2 - 0,086 \cdot \alpha + 0,42 \\ B_1 = 0,043 \cdot \alpha^2 + 0,186 \cdot \alpha - 2,064 \\ B_0 = -0,1 \cdot \alpha^2 - 1,223 \cdot \alpha + 4,546 \end{cases} \quad (2, 3)$$

Зависимости (2) и (3) на области определения  $\cos\varphi = 0,2 \dots 0,9$  и  $\alpha = 60 \dots 120$  °эл. позволяют вычислять значение  $k_i$  с погрешностью, обычно не превышающей 3% (рис. 10), и могут быть использованы в системах компьютерного и микропроцессорного управления контактной сваркой.

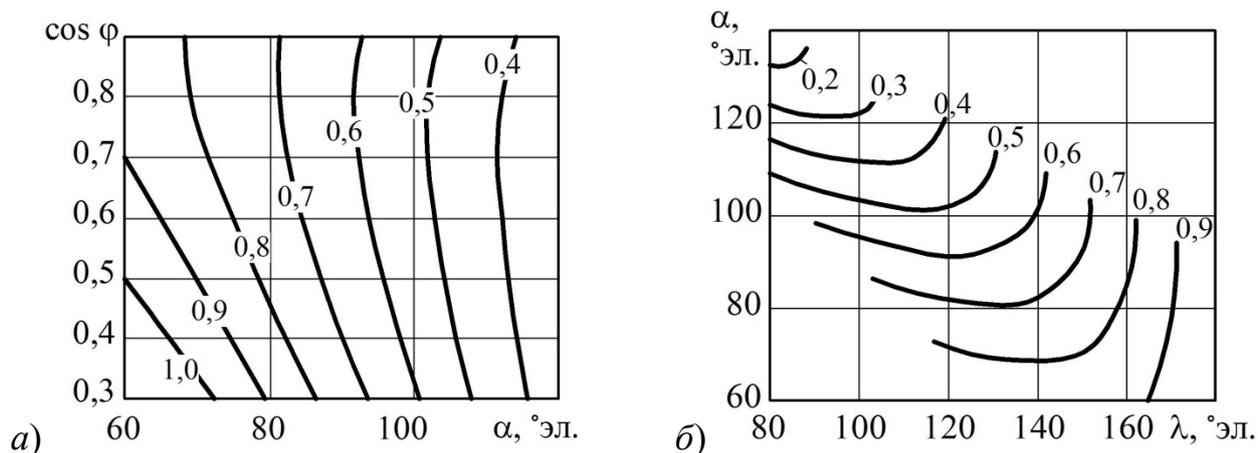


Рисунок 9. Значение коэффициента регулирования  $k_i$  для заданных значений угла открытия  $\alpha$ , коэффициенте мощности  $\cos\varphi$  (а) и угле проводимости  $\lambda$  (б)

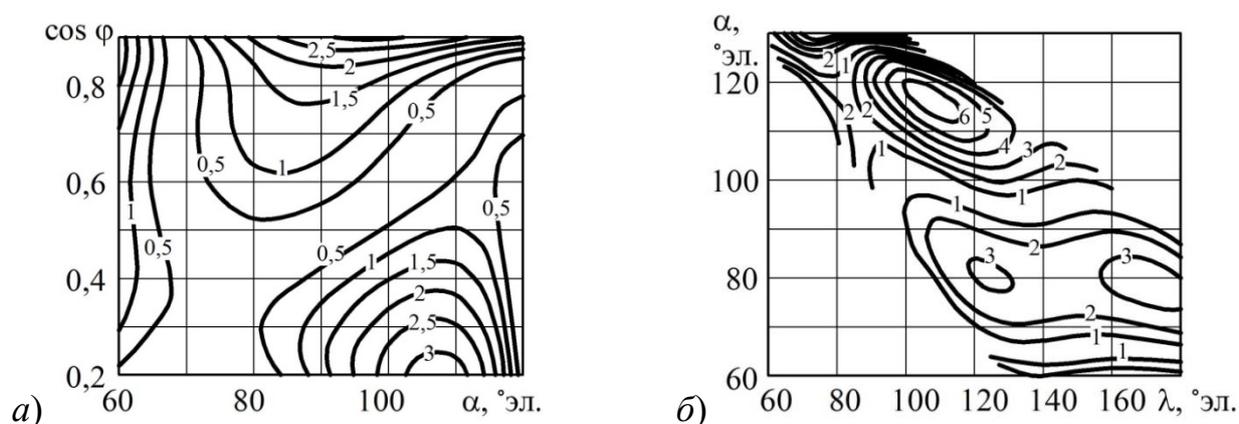


Рисунок 10. Относительная погрешность вычисления  $k_i$  согласно (2) (а) и (3) (б)

Величину коэффициента мощности  $\cos\varphi$  (рис. 11, а) и угла  $\varphi$  (рис. 11, б) предложено расчётным путём определять через углы открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$  как:

$$\begin{cases} \cos\varphi = A_1 \cdot \lambda + A_0; & A_1 = -0,496 \cdot \alpha^3 + 1,826 \cdot \alpha^2 - 2,461 \cdot \alpha + 0,473; \\ A_0 = 0,161 \cdot \alpha^3 - 0,342 \cdot \alpha^2 - 0,1 \cdot \alpha + 2,93 \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \varphi = B_1 \cdot \lambda + B_0; & B_1 = 0,865 \cdot \alpha^2 - 1,9 \cdot \alpha + 2,03; \\ B_0 = 1,023 \cdot \alpha^3 - 5,632 \cdot \alpha^2 + 9,645 \cdot \alpha - 7,126 \end{cases}. \quad (5)$$

Относительная погрешность вычисления  $\cos\varphi$  (рис. 12, а) согласно (4) и абсолютная погрешность вычисления угла  $\varphi$  (рис. 12, б) согласно (5) обычно не превышают 4 % и 2 °эл. соответственно на области наиболее распространённых значений  $\alpha=60\dots130$  °эл.,  $\cos\varphi=0,5\dots0,9$ .

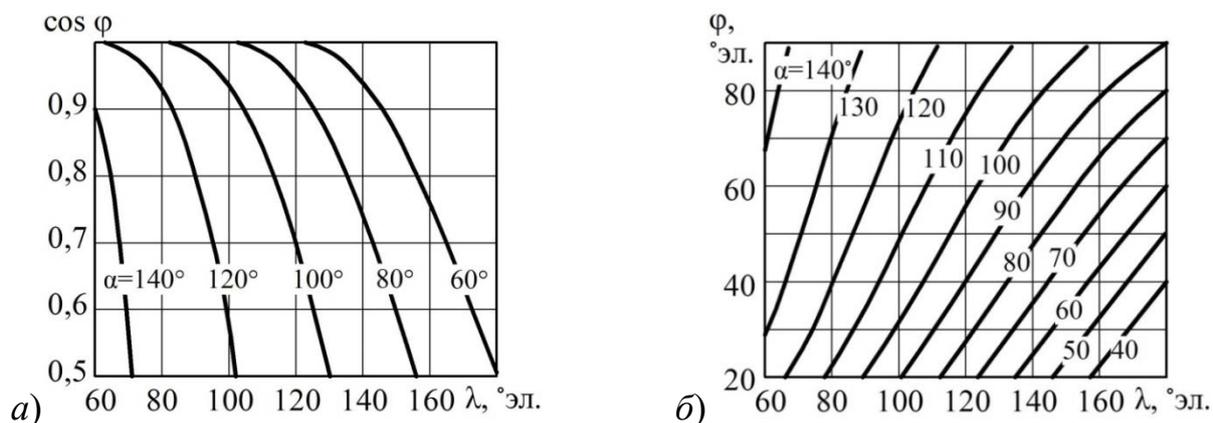


Рисунок 11. Значение коэффициента мощности  $\cos\varphi$  (а) и угла  $\varphi$  (б) в зависимости от измеренного  $\lambda$  при заданных  $\alpha$

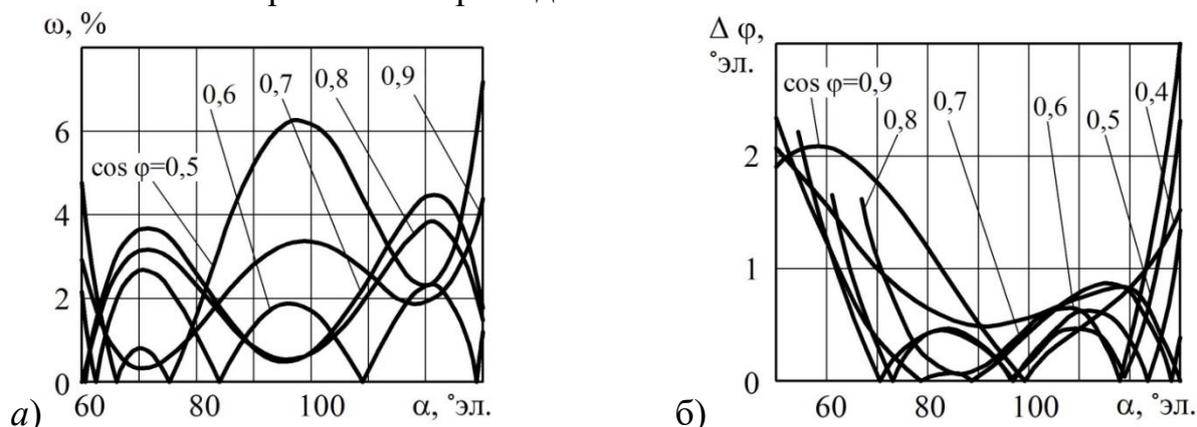


Рисунок 12. Относительная погрешность вычисления  $\cos\varphi$  (а) и абсолютная погрешность вычисления угла  $\varphi$  (б) согласно (5) и (6) соответственно

Для расчётного определения сопротивления  $R_{\Sigma}$  участка «электрод-электрод» предложено использовать регулировочную характеристику  $k_i \cos\varphi$ , являющуюся произведением коэффициентов регулирования тока  $k_i$  и мощности  $\cos\varphi$ , при известных значениях  $\alpha$  и  $\lambda$  выражаемую системой:

$$\begin{cases} k_i \cos\varphi = \cos\varphi \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} - \frac{\sin\lambda}{\pi \cos\varphi} \cos(2\alpha + \varphi + \lambda)} \\ \sin(\lambda + \alpha - \varphi) / \sin(\alpha - \varphi) = \exp(-\lambda \operatorname{ctg} \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

Решая (6) для области определения  $\alpha = 60 \dots 140$  °эл. и  $\cos\varphi = 0,4 \dots 0,9$ , построены номограммы (рис. 13) и аппроксимирующая зависимость

$$k_i \cos\varphi = -0,45\lambda - 0,94\alpha + 2,93. \quad (7)$$

Относительная погрешность вычисления  $k_i \cos\varphi$  согласно (7) в диапазоне наиболее распространённых значений  $\alpha$  и  $\lambda$  не превышает 5 % (рис. 14, а). Сопротивление  $R_{\Sigma}$  для каждого периода сетевого напряжения вычисляется как разность сопротивлений  $R_{2\text{св}}$  и  $R_{2\text{к}}$ , для измеренных  $\alpha$  и  $\lambda$  в режиме сварки и короткого замыкания:

$$R_{\Sigma} = R_{2\text{св}} - R_{2\text{к}} = \frac{U_c}{K_T I_{2\text{св}}} k_i \cos\varphi - R_{2\text{к}}. \quad (8)$$

Приемлемая в большинстве случаев относительная погрешность расчётного определения  $R_{\Sigma}$ , равная 5 %, достигается при абсолютной погрешности измерений  $\Delta\lambda=0,5$  °эл. (рис. 14, б).

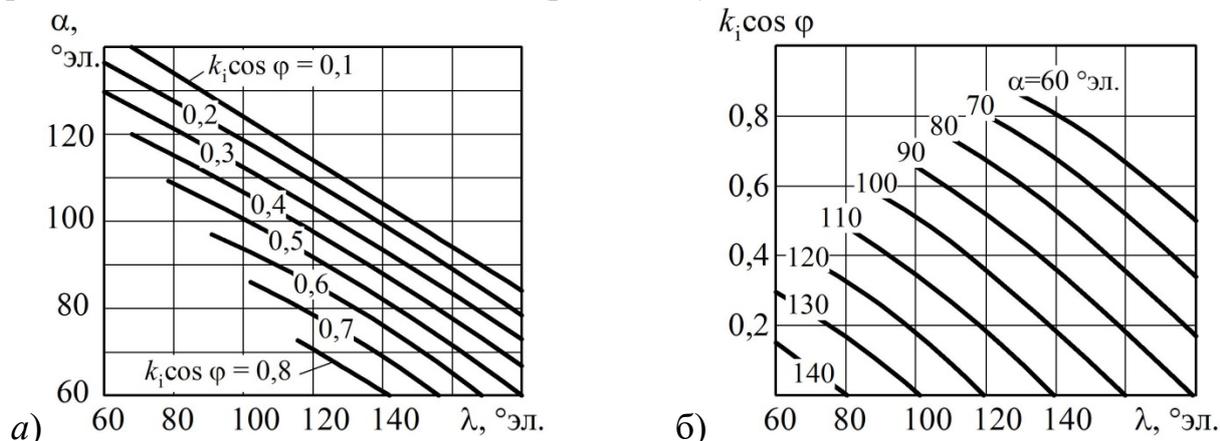


Рисунок 13. Номограммы определения регулировочных характеристик  $k_i \cos\phi$  для заданных  $\alpha$  и  $\lambda$  (а) и фиксированных значений  $\alpha$  (б)

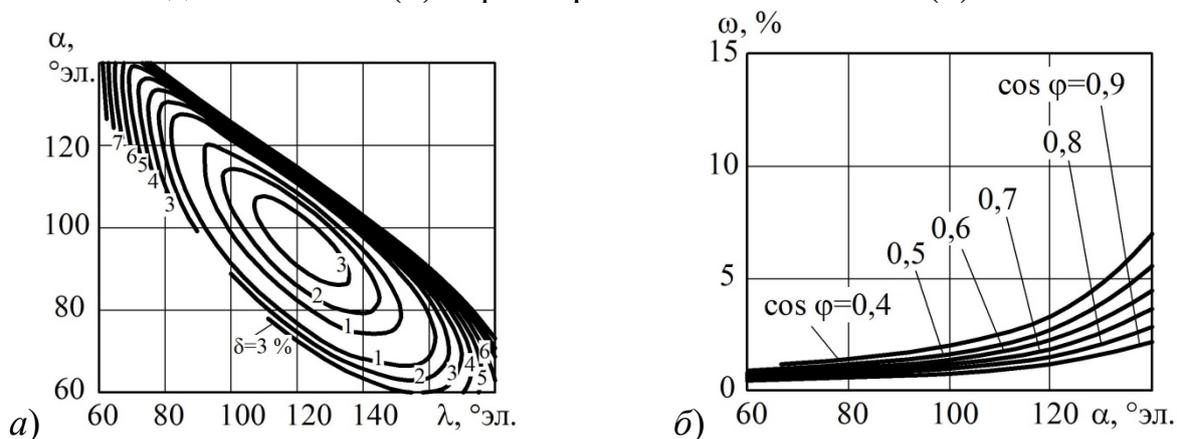


Рисунок 14. Относительная погрешность расчета  $k_i \cos\phi$  (а) и сопротивления  $R_{\Sigma}$  при абсолютной погрешности измерений  $\Delta\lambda = 0,5$  °эл. (б)

Если предположить, что при выполнении сварки индуктивное сопротивление контактной машины не изменяется ( $X_{2к}=\text{const}$ ), тогда сопротивления участка «электрод-электрод» можно оценить как:

$$R_{\Sigma} = X_{2к} \cdot \text{ctg} \phi - R_{2к}. \quad (9)$$

Если для конкретной сварочной машины заранее определены активное  $R_{2к}$  и индуктивное  $X_{2к}$  сопротивления в режиме короткого замыкания, то сопротивление  $R_{\Sigma}$  участка «электрод-электрод» может быть определено для углов открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$ . Для контактных машин МТПУ-300 ( $R_{2к}=130$  мкОм и  $X_{2к}=230$  мкОм), МР-8010 ( $R_{2к}=70$  мкОм и  $X_{2к}=160$  мкОм) и МТ-1933 ( $R_{2к}=210$  мкОм и  $X_{2к}=350$  мкОм) построены номограммы определения  $R_{\Sigma}$  (рис. 15).

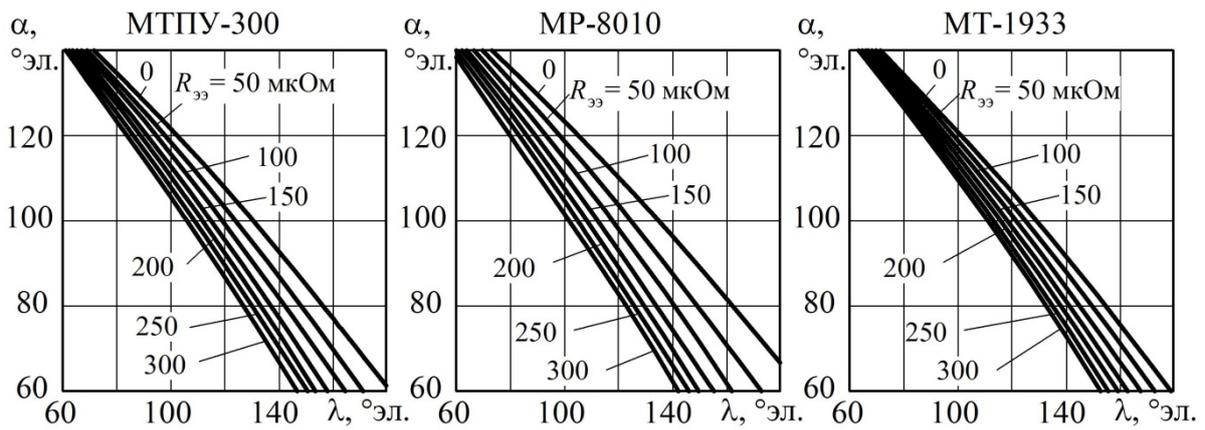


Рисунок 15. Номограммы определения  $R_{33}$  по параметрам фазового регулирования для контактных машин МТПУ-300, МР-8010 и МТ-1933

Для дискретных значений  $\text{ctg } \varphi$  и  $\alpha$  рассчитана длительность  $\lambda$  включенного состояния тиристоров (рис. 16), измерение которой в каждом периоде для известного  $\alpha$  позволяет однозначно определять величину  $\text{ctg } \varphi$ . Погрешность измерения  $\lambda$  и задания  $\alpha$  снижают точность вычисления  $\text{ctg } \varphi$  в условиях глубокого фазового регулирования (рис. 17).

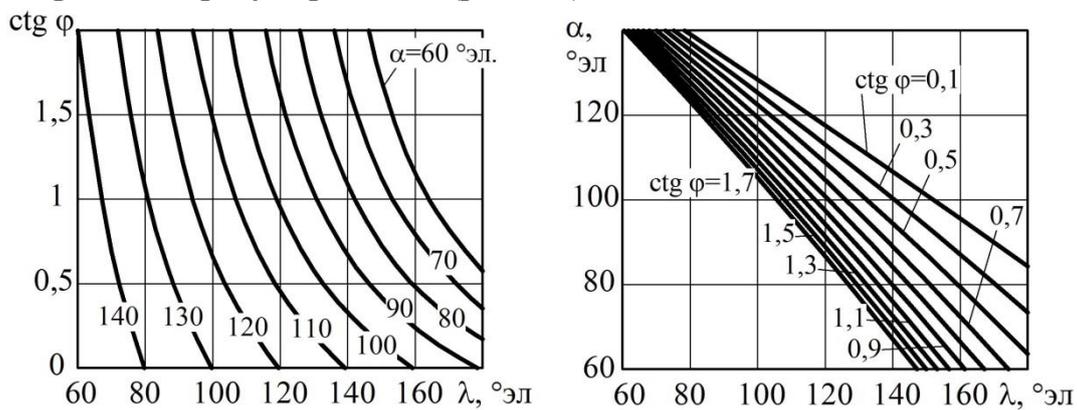


Рисунок 16. Значение  $\text{ctg } \varphi$  для заданных значений  $\alpha$  и  $\lambda$ , °ЭЛ

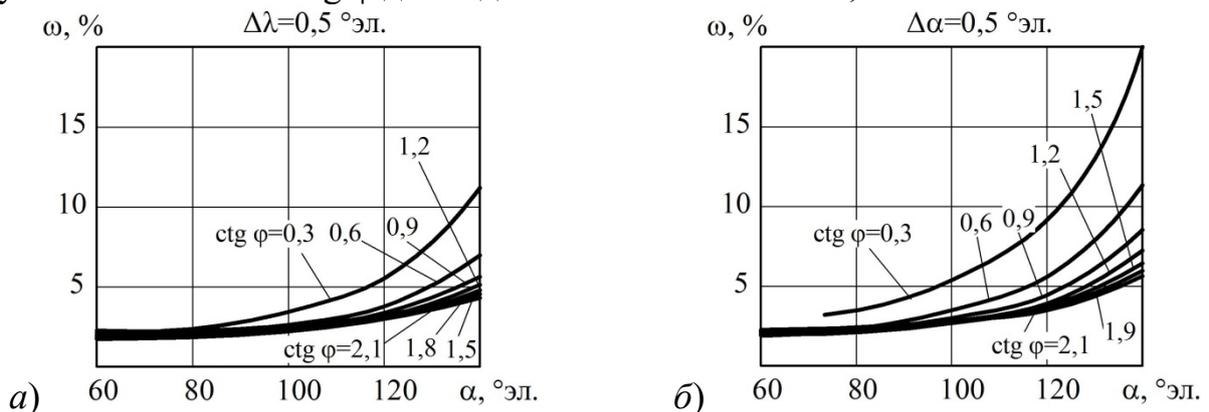


Рисунок 17. Относительная погрешность вычисления  $\text{ctg } \varphi$ , % в зависимости от угла  $\alpha$  и истинного значения  $\text{ctg } \varphi$  для  $\Delta\lambda = 0,5$  °ЭЛ. (а) и  $\Delta\alpha = 0,5$  °ЭЛ. (б)

Для расчёта коэффициента  $\text{ctg } \varphi$  по известным значениям  $\alpha$  и  $\lambda$  предложена аппроксимирующая зависимость:

$$\begin{cases} \operatorname{ctg} \varphi = A_2 \cdot \lambda^2 + A_1 \cdot \lambda + A_0; & A_2(\alpha) = 1,989\alpha^2 - 3,657\alpha + 4,217; \\ A_1(\alpha) = -5,829\alpha^3 + 12,938\alpha^2 - 24,081; & A_0(\alpha) = 4,921\alpha^3 - 19,849\alpha^2 - 43,83. \end{cases} \quad (10)$$

Изменение активного сопротивления участка «электрод-электрод» на величину  $\Delta R_{33}=10$  мкОм вызывает изменение длительности  $\lambda$  включения тиристоров на величину  $\Delta\lambda=0,5\dots2,5$  °эл. в зависимости от угла  $\alpha$ , активного  $R_{2к}$  и индуктивного  $X_{2к}$  сопротивлений машины в режиме короткого замыкания (рис. 18, а и б). При этом требуемая точность вычисления  $\operatorname{ctg} \varphi$  составляет 2...6 % и зависит от величины  $X_{2к}$  конкретной машины (рис. 18, в).

Диагностика качества контактной сварки может быть выполнена при оценке количества тепла  $q_{33}$ , выделившегося при протекании сварочного тока через участок «электрод-электрод». Тепловыделение в каждом периоде сварочного тока при известных углах открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$  может быть вычислено как:

$$\left\{ q_{33} = I_2^2 \cdot R_{33} \cdot T; \quad I_2 = \frac{U_c}{K_T \cdot X_{2к}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \cdot k_1; \quad R_{33} = X_{2к} \cdot \operatorname{ctg} \varphi - R_{2к}, \quad (11) \right.$$

При известных значениях  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$  решение (11) может быть представлено в виде таблицы или номограммы, заранее рассчитанной для всех возможных сочетаний  $\alpha$  и  $\lambda$  (рис. 19).

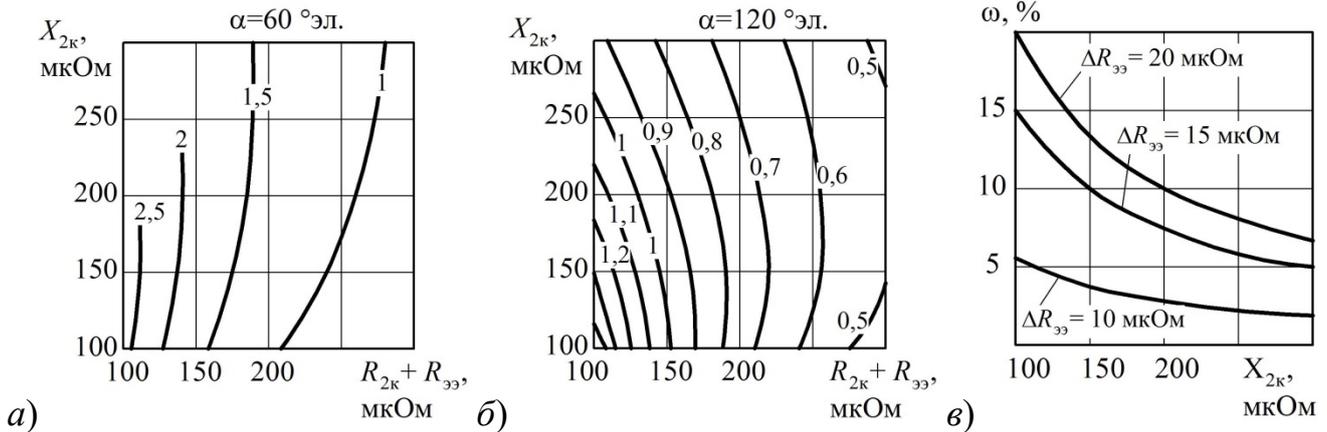


Рисунок 18. Изменение длительности  $\lambda$ , °эл. для  $\Delta R_{33}=10$  мкОм, значениях  $\alpha=60$  °эл. (а),  $\alpha=120$  °эл. (б) и сопротивления сварочного контура и требуемая точность  $\omega$  вычисления  $\operatorname{ctg} \varphi$  для отслеживания заданного  $\Delta R_{33}$  при различных значениях  $X_{2к}$  (в)

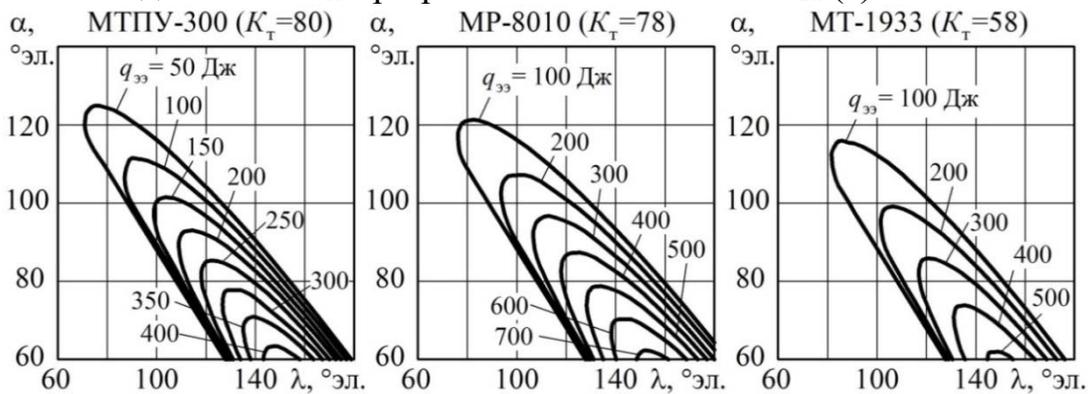


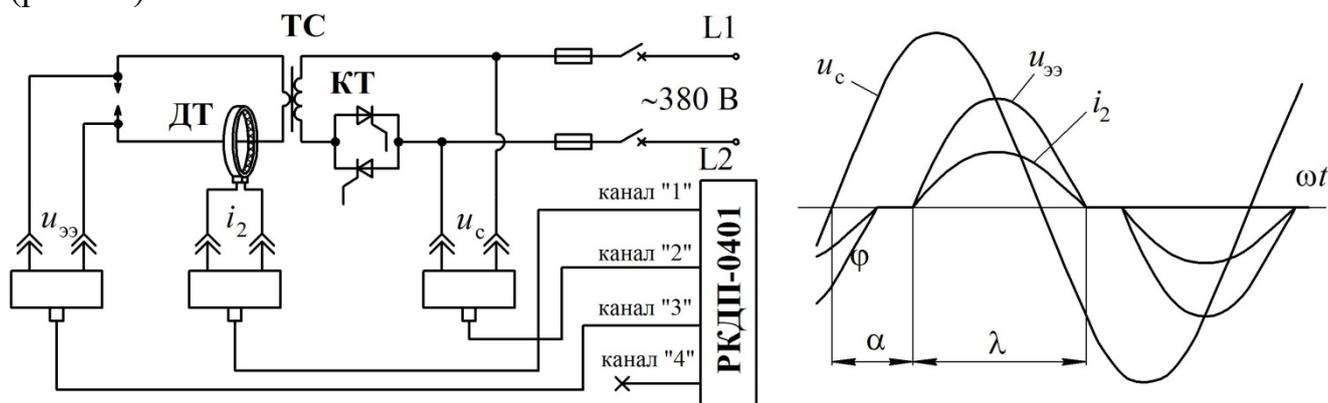
Рисунок 19. Тепловыделение на участке «электрод-электрод» в зависимости от измеренных значений  $\alpha$  и  $\lambda$

Апробацию предлагаемых методик выполняли на машине МТ-1933 при сварке корпуса топливного бака автомобиля ВАЗ-2123 (рис. 20), из стали DX54D толщиной 0,9+0,9 мм с алюминиево-кремниевым покрытием AS толщиной 10...20 мкм, полученным методом погружения (DX54D+AS080). Измерения производили при сварке точки № 13 – приварка перегородки к полукорпусу. При сварке использовали электроды с диаметром рабочей поверхности 4...5 мм.



Рисунок 20. Корпус топливного бака автомобиля ВАЗ 2123

Измерение углов открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$  тиристоров для каждого периода сетевого напряжения выполняли по осциллограмме тока  $I_2$  и напряжения  $U_c$ . Измерение вторичного тока  $i_2$ , сетевого напряжения  $u_c$  и падения напряжения на электродах  $u_{ээ}$  производится с использованием регистратора РКДП-0401, датчика вторичного тока (пояс Роговского) и кабель-адаптеров на 600 В и на 10 В (рис. 21).



ТС – сварочный трансформатор; КТ – тиристорный контактор; ДТ – датчик тока

Рисунок 21. Схема получения осциллограмм вторичного тока, сетевого напряжения и напряжения на электродах на контактной машине при проведении экспериментальных сварок

Для известных значений  $\alpha$  и  $\lambda$  согласно (11) для каждого периода сетевого напряжения вычисляли вторичный ток  $I_{2,p}$ , сопротивление участка «электрод-электрод»  $R_{ээ,p}$  и тепловыделение  $q_{ээ,p}$  (рис. 23), которые сравнивали с измеренными значениями  $I_2$ ,  $R_{ээ}$  и  $q_{ээ}$ . Погрешность расчётного определения вторичного тока  $I_2$  составила 6%, сопротивления участка «электрод-электрод» – 7%, тепловыделения  $q_{ээ}$  – 10% (рис. 22).

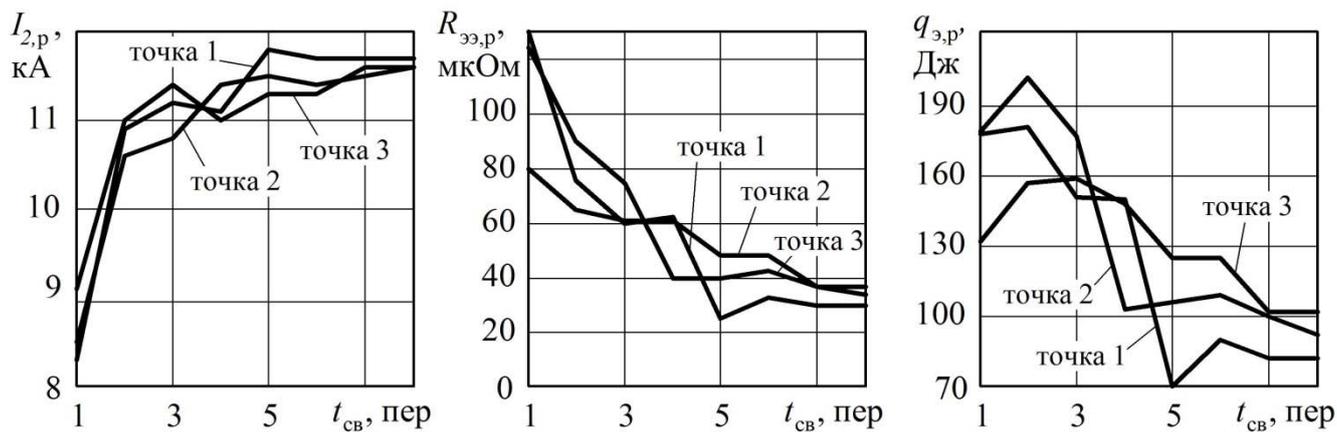


Рисунок 22. Расчётные значения вторичного тока  $I_{2,p}$ , сопротивления «электрод-электрод»  $R_{ээ,p}$  и тепловыделения  $q_{ээ,p}$

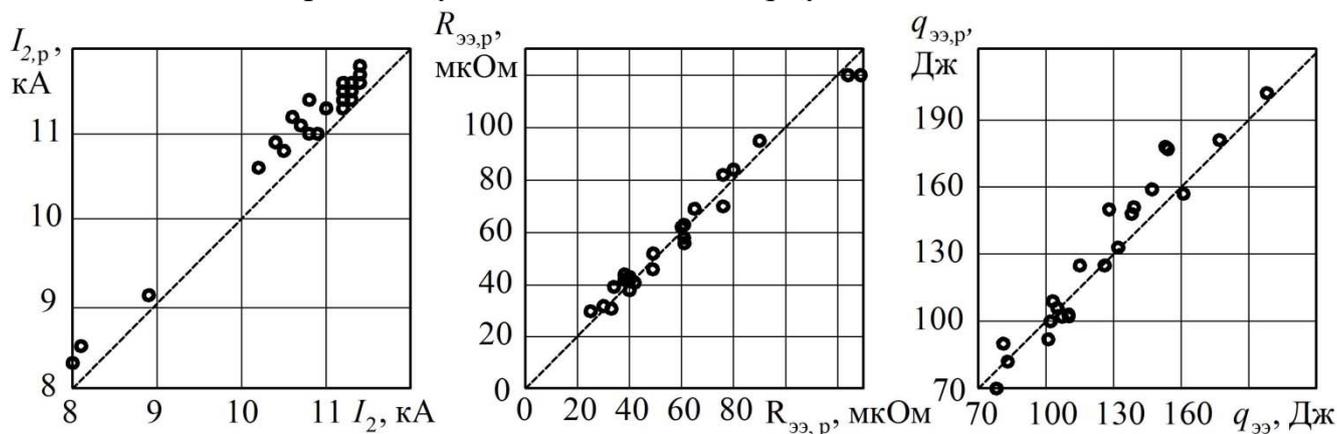


Рисунок 23. Сравнение расчётных значений тока  $I_{2,p}$ , сопротивления  $R_{ээ,p}$  и тепловыделения  $q_{ээ,p}$  с измеренными

Прогнозирование прочности сварных соединений выполняли при помощи нейронной сети Хэмминга, реализованной с помощью собственного программного обеспечения SW Neural Net. При формировании обучающей выборки выполняли сварку экспериментальных образцов из стали 08кп толщиной  $0,8+0,8$  мм на машине МТПУ-300 в режиме стабилизации тока, задавали сварочное усилие  $F_{св} = 3$  кН и длительность сварочного импульса  $t_{св} = 0,18$  с. Сварочный ток изменяли в диапазоне  $5,5 \dots 10,5$  кА.

В процессе сварки в каждом периоде измеряли параметры фазового управления – углы открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$  тиристоров, по которым рассчитывали  $\text{ctg } \varphi$ . Таким образом, для каждого образца был получен вектор нормированных значений  $\text{ctg } \varphi^N$  вида  $(P_1, P_2, \dots, P_n)$ , где  $n$  – длительность сварочного импульса в периодах сетевого напряжения (рис. 24, а). Значения компонентов вектора  $P_1 \dots P_n$  нормируются путем линейного преобразования к диапазону  $0 \dots 1$  (где 0 соответствует наименьшему значению компоненты, а 1 – наибольшему). После сварки образцы испытывали на срез согласно ISO 14273:2000 на разрывной машине Н50КТ (Tinius Olsen, Ltd., Великобритания) (рис. 24, б).

Были построены биполярные матрицы изменения  $\text{ctg } \varphi^N$  для семи шаблонов и соответствующих им разрушающих усилий (рис. 25, а), которые заносили в нейронную сеть при её обучении.

Тестирование нейронной сети в процессе сварки проводили при силе тока 6,5; 8 и 9,5 кА и диаметре электрода 5; 6 и 7 мм. Нейронная сеть сравнивала биполярные матрицы тестовых сварок с полученными ранее шаблонными матрицами. Прочность сварного соединения прогнозировали на уровне прочности наиболее близкого к нему шаблона. Сила разрушения экспериментальных образцов в большинстве случаев совпадала с диапазоном силы разрушения соответствующего шаблона (рис. 26, б), при этом относительная погрешность не превышала 10 %.

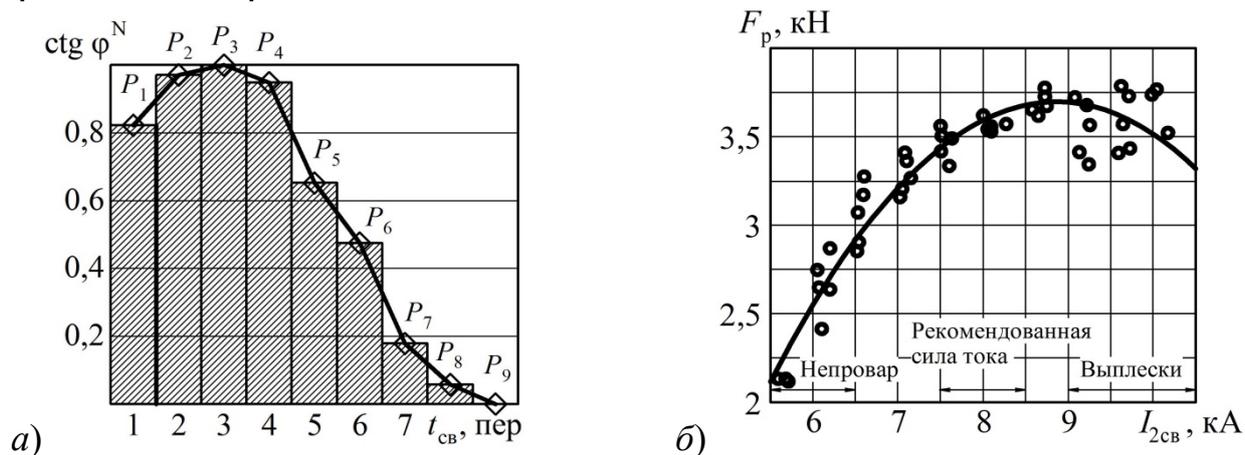


Рисунок 24. Пример построения вектора  $\text{ctg } \varphi^N$  одной сварной точки (а) и результаты испытаний при формировании обучающей выборки

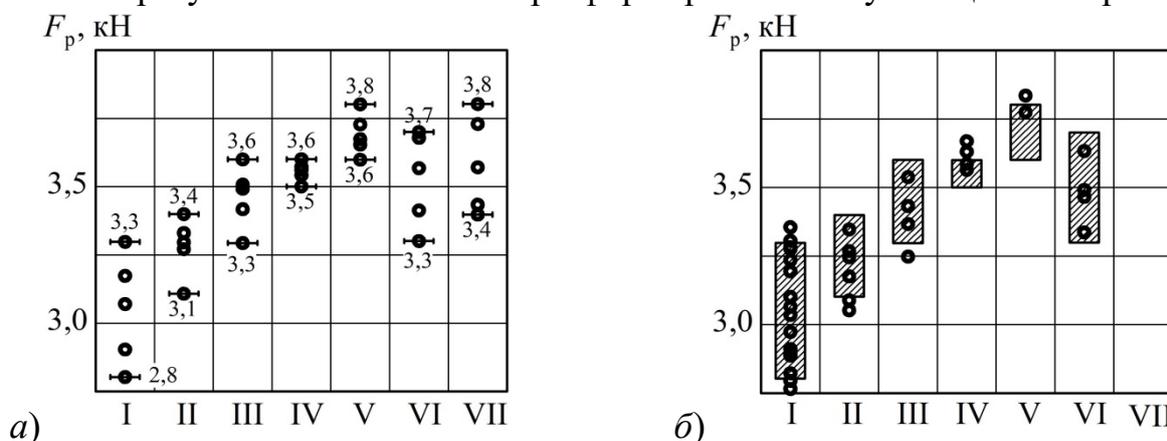


Рисунок 25. Диапазон силы разрушения  $F_p$  для каждого шаблона при обучении сети (а) и результаты испытания на прочность экспериментальных соединений (б)

**В четвёртой главе** предложены и апробированы методики диагностики состояния контактных машин.

Активное  $R_{2к}$  и индуктивное  $X_{2к}$  сопротивления машины в режиме короткого замыкания могут быть вычислены как:

$$R_{2к} = \frac{U_c}{K_T I_2} k_i \cos \varphi \text{ и } X_{2к} = \frac{U_c}{K_T I_2} k_i \sin \varphi, \quad (12), (13)$$

где  $K_T$  – коэффициент трансформации;  $U_c$  – напряжение питающей сети;  $I_2$  – сила тока во вторичном контуре,  $k_i \cos \varphi$  и  $k_i \sin \varphi$  – предложенные регулировочные характеристики, которые задаются для известных значений углов открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$  тиристоров (рис. 13, а) и (рис. 26, а).

Измерение активного  $R_{2к}$  и индуктивного  $X_{2к}$  сопротивлений целесообразно выполнять при фиксированном значении угла открытия тиристоров  $\alpha = 90^\circ$  эл., Характеристики  $k_i \cos \varphi$  и  $k_i \sin \varphi$  для  $\alpha = 90^\circ$  эл. предложено аппроксимировать линейными двучленами:

$$k_i \cos \varphi = -0,497\lambda + 1,573 \text{ и } k_i \sin \varphi = 0,642\lambda - 1,024, \quad (14), (15)$$

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

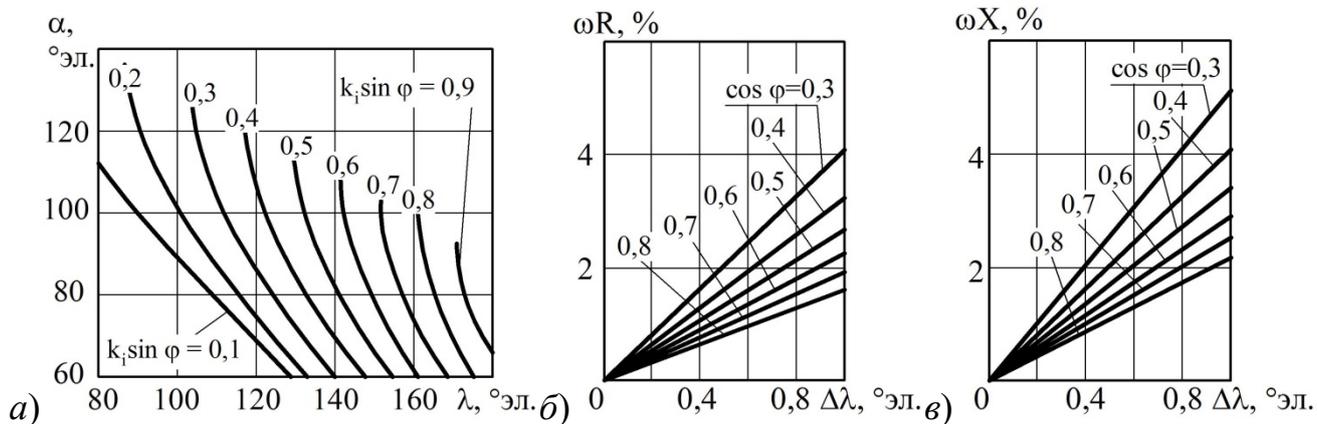


Рисунок 26. Номограмма регулировочной характеристики  $k_i \sin \varphi$  (а) относительные погрешности расчета активного  $\omega R$  (б) и индуктивного  $\omega X$  (в) сопротивлений при  $\alpha = 90^\circ$  эл. для абсолютной погрешности измерений  $\Delta \lambda = 0 \div 1^\circ$  эл.

Измерение вторичного тока  $I_2$ , угла проводимости  $\lambda$  и расчётное определение коэффициента мощности  $\cos \varphi$  (а также сопутствующих регулировочных характеристик) выполняется с определённой точностью, зависящей от используемого измерительного оборудования. Диаграммы относительных погрешностей расчета активного  $\omega R$  (рис. 26, б) и индуктивного  $\omega X$  (рис. 26, в) 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  $\lambda$  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  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$ , равная 3 %, достигается при  $\Delta \lambda = 0,8^\circ$  эл. и  $\alpha = 90^\circ$  эл. При условии измерения вторичного тока и определения коэффициента мощности с точностью соответственно 2,5 % и 0,02,  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$  для машины МТПУ-300 могут быть определены с точностью 6 % (рис. 27).

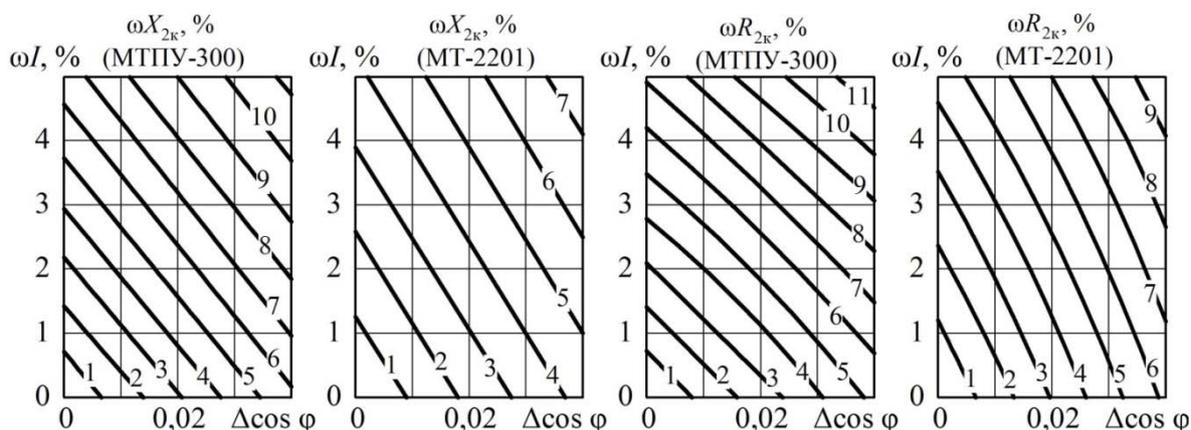


Рисунок 27. Погрешность вычисления  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$  для машин МТПУ-300 и МТ-2201 в зависимости от точности измерения вторичного тока  $I_2$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$

Оценку величин  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$  конкретной сварочной машины предложено выполнять по результатам измерения вторичного тока  $I_2$  при включении в режиме короткого замыкания с различными углами открытия тиристорov. Для каждого угла строятся изолинии, являющиеся геометрическим местом точек, координаты которых соответствуют значениям активного и индуктивного сопротивлений, при которых развивается измеренный ток. Для конкретной сварочной машины все графики  $R_{2к}=f(X_{2к})$  пересекаются в одной узкой области (рис. 28), координаты точки пересечения являются искомыми значениями  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$ .

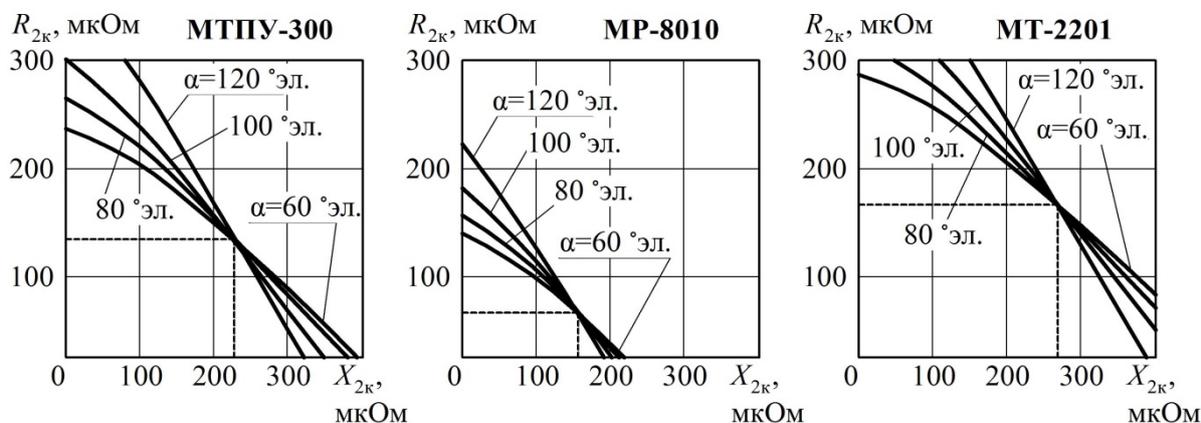


Рисунок 28. Графики  $R_{2к}=f(X_{2к})$  для машин МТПУ-300, МР-8010 и МТ-2201 (в) при  $\alpha=60, 80, 100, 120$  °эл.

Функция  $R_{2к}=f(X_{2к})$ , может быть аппроксимирована как:

$$R_{2к} = a_1 \cdot X_{2к} + a_0, \quad (16)$$

где линейный коэффициент  $a_1$  задают для каждого включения контактной машины в зависимости от выбранного угла  $\alpha$  открытия тиристорov:

$$a_1 = -0,352\alpha^2 + 0,584\alpha - 0,803, \quad (17)$$

свободный член  $a_0$  вычисляют в зависимости от угла  $\alpha$  открытия тиристорov, измеренного вторичного тока  $I_2$  и сетевого напряжения  $U_c$  согласно:

$$a_0 = (6,465\alpha^2 - 37,682) \cdot K_a^{-2} + (-0,152\alpha^2 + 1,144) \cdot K_a^{-1}, \quad (18)$$

где  $K_a = I_2 K_T / U_c$ .

Значения линейного коэффициента  $a_1$  и свободного члена  $a_0$  для фиксированных углов  $\alpha$  открытия тиристоров могут быть заданы как

$$a_1 = \begin{cases} -0,57 & \text{при } \alpha = 60^\circ \text{эл.} \\ -0,68 & \text{при } \alpha = 80^\circ \text{эл.} \\ -0,85 & \text{при } \alpha = 100^\circ \text{эл.} \\ -1,135 & \text{при } \alpha = 120^\circ \text{эл.} \end{cases} \quad \text{и } a_0 = \begin{cases} -29,1K_a^{-2} + 0,97K_a^{-1} & \text{при } \alpha = 60^\circ \text{эл.} \\ -24,7K_a^{-2} + 0,85K_a^{-1} & \text{при } \alpha = 80^\circ \text{эл.} \\ -18,2K_a^{-2} + 0,68K_a^{-1} & \text{при } \alpha = 100^\circ \text{эл.} \\ -9,20K_a^{-2} + 0,48K_a^{-1} & \text{при } \alpha = 120^\circ \text{эл.} \end{cases} \quad (19), (20)$$

При расчётном определении активного и индуктивного сопротивлений контактных машин выполняют два включения в режиме короткого замыкания с заданными углами включения тиристоров  $\alpha' \neq \alpha''$ . С использованием известных приборов (например, многофункционального измерителя контактной сварки МИКС-2М) измеряют действующий ток  $I_2$  во вторичном контуре для каждого включения. Далее по аппроксимирующим зависимостям (16)...(20) рассчитывают значения  $a_0$ ,  $a_1$  и определяют искомые значения  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$  как

$$R_{2к} = \frac{a_0'' a_1' - a_0' a_1''}{a_1' - a_1''} \quad \text{и} \quad X_{2к} = \frac{a_0'' - a_0'}{a_1' - a_1''}. \quad (21), (22)$$

Апробацию методик измерения электрического сопротивления выполняли на многоэлектродных машинах МСМ 503.651.421 и МСМ 503.618.421 (рис. 29).



а)

б)

Рисунок 29. Оснастки сварочных машин МСМ 503.651.421 (а) и МСМ 503.618.421 (б)

На машине МСМ 503.618.421 выполняли включение каждой сварочной группы в режиме короткого замыкания с углом открытия тиристоров  $\alpha = 60, 80, 100$  и  $120^\circ$  эл. При каждом включении с использованием регистратора РКДП-0401 выполняли замер напряжения  $U_c$  питающей сети и вторичного тока  $I_2$ . Для каждого включения вычисляли линейный коэффициент  $a_1$ , коэффициент  $K_a$  и свободный  $a_0$  согласно (19) и (20).

По результатам измерений для каждой сварочной клещей в системе координат  $X_{2к}-R_{2к}$  строили графики  $R_{2к} = f(X_{2к})$  (рис. 30) согласно (21) и (22). Как видно, для конкретной сварочной группы все графики  $R_{2к} = f(X_{2к})$  пересекаются в достаточно узкой области, что позволяет найти искомые значения  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$ .

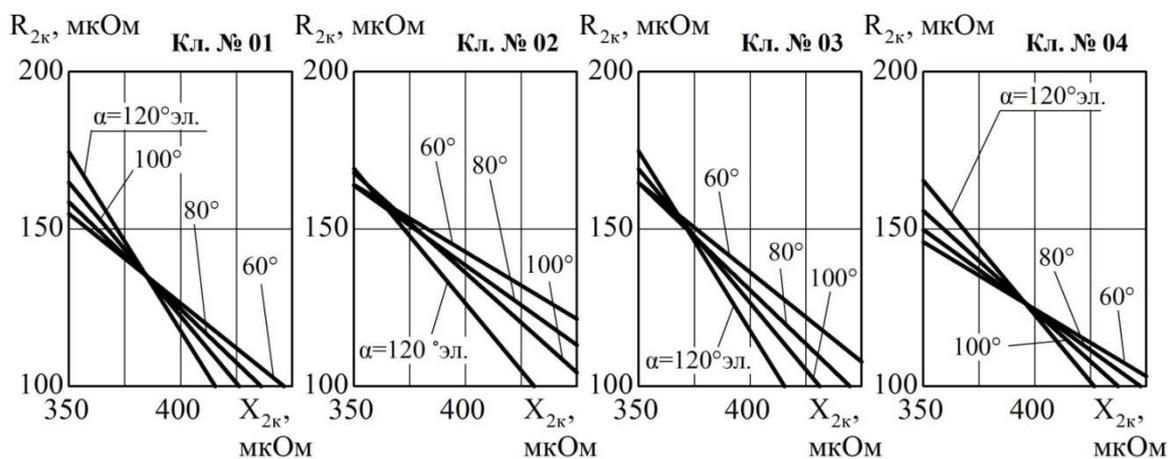


Рисунок 30. Графики  $R_{2к} = f(X_{2к})$  для клещей №№ 01, 02, 03 и 04 многоэлектродной машины МСМ 503.618.421

Включали клещи и пистолеты каждого поста машины МСМ 503.651.421 в режиме короткого замыкания с углом открытия тиристорov  $\alpha = 80^\circ$  эл. В процессе включения при помощи регистратора РКДП-0401 измеряли напряжение  $U_c$  сети, ток  $I_2$  во вторичном контуре и длительность импульса тока  $\lambda$ . Далее согласно (19)...(22) вычисляли значения  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$ .

В течение восьми недель на машине МСМ 503.651.421 было сварено 100 тыс. деталей. На указанном отрезке времени каждую неделю повторяли опыт короткого замыкания и рассчитывали значение активного сопротивления  $R_{2к}$  (рис. 31). В процессе сварки произошёл выход из строя гибких неохлаждаемых переключателей в цепи сварочных пистолетов № 4 и № 5, сварочных клещей № 1 и № 2. После замены переключателей замеры сопротивлений в соответствующих им цепях прекратили.

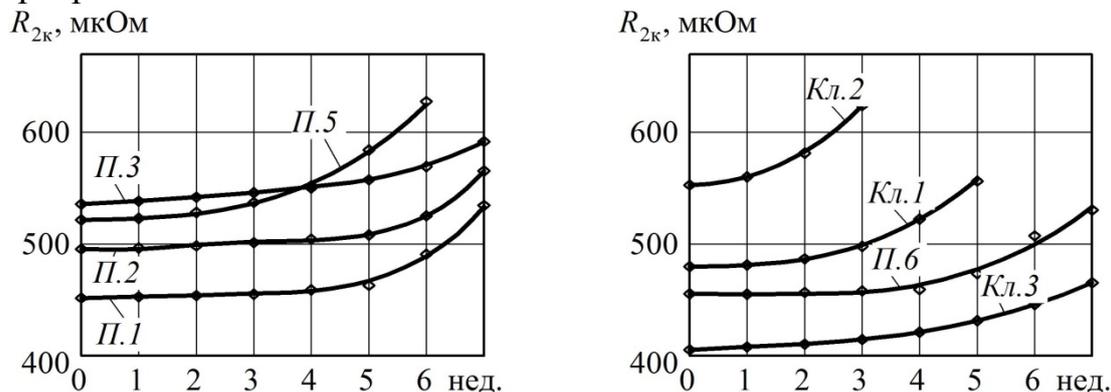


Рисунок 31. Динамика изменения активного сопротивления  $R_{2к}$  контуров машины МСМ 503.651.421 в процессе продолжительной работы

Для каждой переключки существует «пограничное состояние», после которого её эксплуатация нерациональна, так как приводит к катастрофическому износу и аварийному разрушению переключки. Переход одного из элементов контура в «пограничное состояние» может быть отслежен по резкому росту  $R_{2к}$ . Применительно ко вторичным контурам машины МСМ 503.651.421, включающим в себя гибкие неохлаждаемые переключки сечением  $300 \text{ мм}^2$ , критическим можно признать рост  $R_{2к}$  на 40 мкОм в неделю. Так, по результатам

измерений было прогнозировано скорое разрушение перемычек в цепи сварочных пистолетов № 1 и № 2, что и произошло на следующей неделе после прекращения измерений (рис. 33).

Методика контроля состояния вторичного контура многоэлектродной машины предусматривает включение в режиме короткого замыкания, измерение действующих значений сетевого напряжения  $U_c$ , вторичного тока  $I_2$  и длительности  $\lambda$  импульса тока, вычисление активного сопротивления  $R_{2к}$  вторичного контура. Значение  $R_{2к}$  сравнивается с ранее определённым, хранящимся в памяти системы управления  $R_{2к}'$ , в случае превышения величины ( $R_{2к} - R_{2к}'$ ) заданного значения (40 мкОм для вторичных контуров с перемычками сечением 300 мм<sup>2</sup>), принимается решение о замене элементов вторичного контура.

Предлагаемый алгоритм был реализован на многоэлектродной машине MCM 503.651.421, управляемой системой PST 6000 (производства фирмы «BOSCH REXROTH») путём доработки программного обеспечения, что позволило производить диагностику состояния вторичных контуров в автоматическом режиме.



Рисунок 32. Внешний вид (а) и частичное разрушение токоведущей части (б) гибкой неохлаждаемой перемычки сечением 300 мм<sup>2</sup>

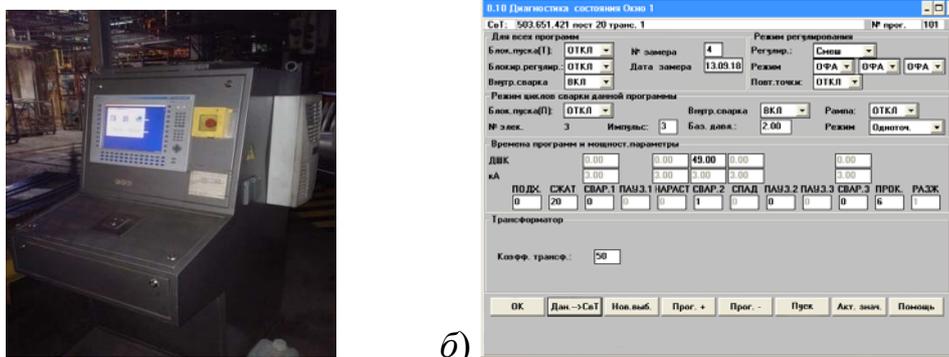


Рисунок 33. Станция диагностики автоматических линий сварки (а) и скриншот программы диагностики состояния сварочного оборудования

**В пятой главе** описаны принципы построения управляющей аппаратуры, алгоритмы управления, синтезированные с учётом закономерностей протекания электрических процессов в системе «машина – деталь», и результаты апробации предложенных решений в промышленности.

Предложен исследовательский комплекс компьютерного управления (рис. 34) включающий в себя: терминал управления (персональная ЭВМ) 1, контроллер 2, модуль питания и согласования уровней 3, блок согласования интерфейсов (БСИ) 4, контактную сварочную машину 5 с исполнительными устройствами, датчиком обратной связи и органами управления. Через ПЭВМ 1 в

контроллер 2 вводится алгоритм управления, циклограмма сварки, параметры сети и данные о состоянии сварочного оборудования.

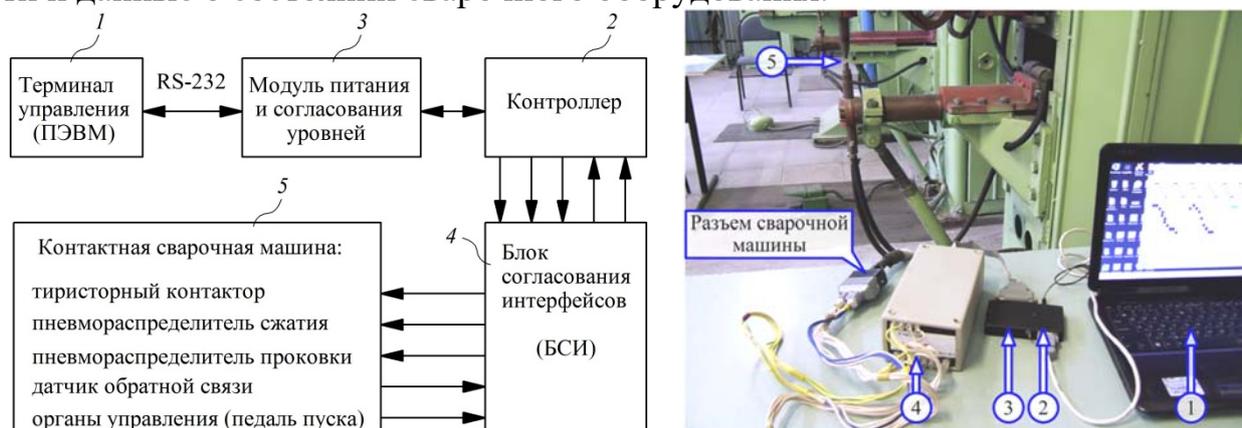


Рисунок 34. Структура компьютерного управления контактной сваркой

Для промышленности предложен регулятор контактной сварки СК-300 (рис. 35, а), реализующий в зависимости от настроек следующие алгоритмы управления: стабилизации вторичного тока, стабилизации тепловыделения за период, стабилизации тепловыделения за цикл сварки, управление по сопротивлению участка «электрод-электрод». Функциональная схема регулятора включает в себя (рис. 35, б) микроконтроллер 1, программатор 2, узлы измерения напряжения и синхронизации 3 и 4, узел включения тиристоров 5 и детектор включения тиристоров 6.

Алгоритм управления  $\alpha=f(\alpha', \lambda')$  представлен в виде набора таблиц, в которых значение  $\alpha$  просчитано для всех возможных сочетаний измеренных  $\lambda'$  и заданных  $\alpha'$  при заранее определённых параметрах контактной машины ( $R_{2к}$ ,  $X_{2к}$  и  $K_T$ ) и сети ( $R_c$  и  $L_c$ ).

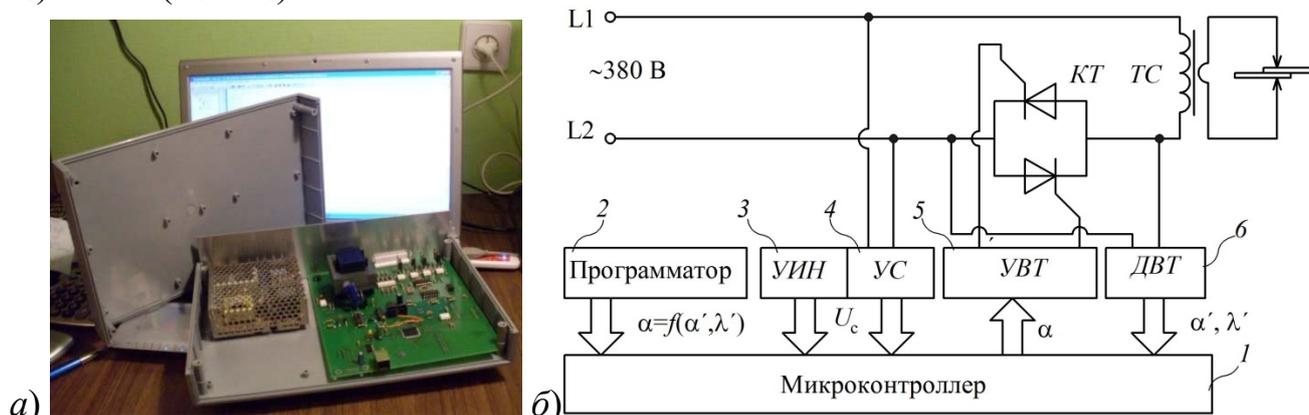


Рисунок 35. Внешний вид (а) и функциональная схема (б) Регулятор контактной сварки СК-300

При колебаниях сетевого напряжения в диапазоне  $380 \text{ В} \pm \Delta U$  угол  $\alpha$  открытия тиристоров в зависимости от измеренного сетевого напряжения  $U_c$  задаётся как:

$$\left\{ \alpha = A_1 \cdot (U_c - U_1) + A_0; A_0 = \alpha_1; A_1 = (\alpha_2 - \alpha_1) / (\Delta U \sqrt{2}), \right. \quad (23)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – таблицы  $\alpha=f(\alpha', \lambda')$ , рассчитанные для пониженного  $U_1=U_{c,n}-\Delta U/\sqrt{2}$  и повышенного  $U_2=U_{c,n}+\Delta U/\sqrt{2}$  напряжений сети,  $\Delta U$  – максимально возможное отклонение напряжения сети от номинального  $U_n$  (рис. 36, б),  $A_0$  и  $A_1$  – управляющие таблицы, рассчитанные на основании  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Перед началом сварки через программатор 2 вводят в память микроконтроллера 1 управляющие таблицы  $A_0$  и  $A_1$ . В процессе сварки на основании сигналов, полученных от измерителя напряжения 3, узла синхронизации 4, детектора включения тиристоров б и хранящихся в памяти таблиц  $A_0$  и  $A_1$ , микроконтроллер 1 принимает решение о корректировке угла  $\alpha$  включения тиристоров в следующем периоде согласно (23).

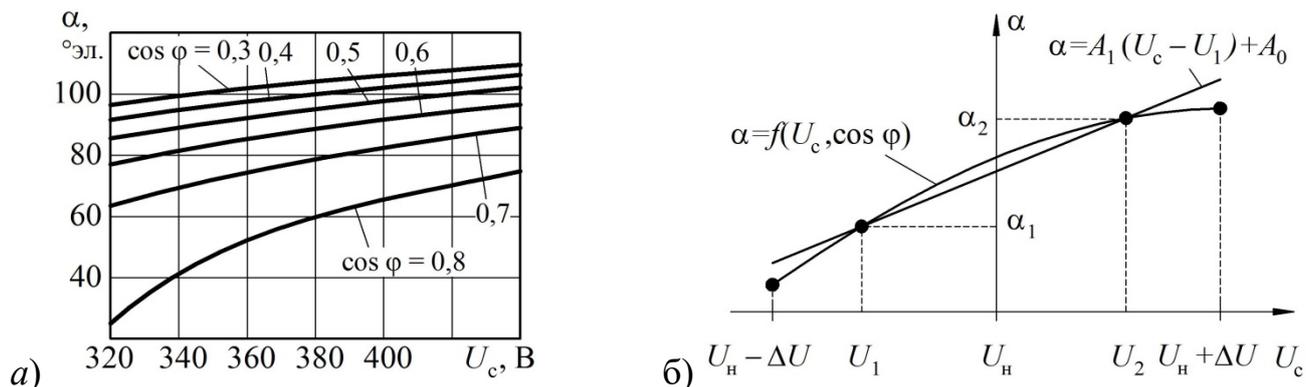


Рисунок 36. Графическая зависимость  $\alpha=f(U_c, \cos \varphi)$  для  $I_{2,зад} = 8000$  А на машине МТ-2201, VI ступень,  $K_T=94$  (а) и аппроксимация  $\alpha=f(\alpha', \lambda', U_c)$  согласно (23) (б)

Для систем, предусматривающих измерение и регулирование вторичного тока, требуемый угол  $\alpha$ , при котором обеспечивается заданный ток  $I_{2,зад}$ , предложено вычислять в зависимости от принятого угла  $\alpha'$  и измеренного тока  $I_2'$  в предыдущем периоде:

$$\alpha = \alpha' + (I_{2,зад}/I_2' - 1)k_i/B_1, \quad (24)$$

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

Отношение коэффициента регулирования  $k_i$  к линейному коэффициенту  $B_1$  может быть вычислено по аппроксимирующей зависимости (рис. 37):

$$\begin{cases} k_i/B_1 = A_1\lambda + A_0; A_0 = 1,521\alpha^3 - 9,86\alpha^2 + 22,55\alpha - 19,027; \\ A_1 = -0,309\alpha^3 + 1,986\alpha^2 - 4,394\alpha + 3,627. \end{cases}, \quad (25)$$

При синтезе управляющих алгоритмов значения  $I_2$  и  $R_{э}$ , предложено заменить безразмерными относительными током  $\tau_i$  и сопротивлением  $\tau_R$ , вычисляемыми как:

$$\tau_i = I_2/I_0, \quad \tau_R = R_{э}/R_0 \quad (26)$$

где  $I_0$  – опорный ток, равный вторичному току, обеспечивающему качественное соединение в отсутствии возмущений;  $R_0$  – опорное сопротивление участка

«электрод-электрод», равное сопротивлению участка «электрод-электрод» в конце процесса сварки в отсутствии возмущений.

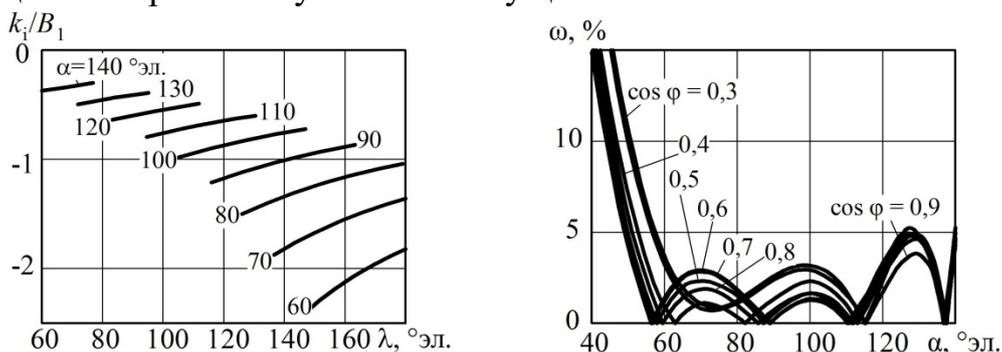


Рисунок 37. Отношение  $k_i/B_1$  в зависимости от угла  $\lambda$  проводимости тиристоров при заданном значении угла  $\alpha$  открытия тиристоров (а) и относительная погрешность  $\omega$  вычисления  $k_i/B_1$  согласно (24) (б)

В этом случае становится возможным задавать действующее значение вторичного тока  $I_2$  в зависимости от значений  $I_0$  и  $R_0$  в соответствии с заранее определённым законом  $\tau_i = f(\tau_R)$ .

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

$$\tau_i = k\tau_R + b, \text{ при } \tau_R \leq 1, \tau_i = 1, \text{ при } \tau_R > 1 \quad (27)$$

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

Эффективность предложенного алгоритма управления током проверена при сварке образцов толщиной 0,8+0,8 мм из стали 08Ю с электроцинковым покрытием и DP 500 с горячецинковым покрытием. Сварку выполняли на машине МТ-2201 электродами с диаметром рабочей поверхности 4,6 мм (образец № 1), 6 мм при стабилизации тока (образец № 2) и 6 мм с управлением током по предлагаемому алгоритму (образец № 3). Сварку образцов из стали 08Ю вели на режиме:  $F_{св} = 2,0$  кН,  $t_{св} = 0,18$  с,  $I_0 = 8$  кА,  $R_0 = 100$  мкОм,  $\Delta_i = 0,4$ . Сварку образцов из стали DP 500 вели на режиме:  $F_{св} = 2,5$  кН,  $t_{св} = 0,36$  с,  $I_0 = 6,5$  кА,  $R_0 = 150$  мкОм,  $\Delta_i = 0,4$ . Установлено, что управление током по предложенному алгоритму по сравнению со стабилизацией тока позволяет избежать непровара при износе электродов (рис. 38 и 39).

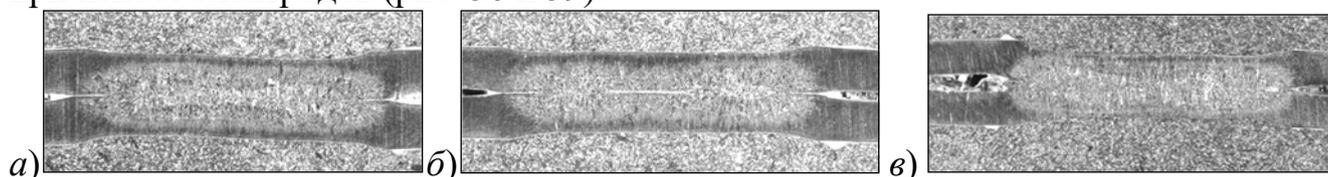


Рисунок 38. Макрошлифы образцов (сталь 08Ю): № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в)

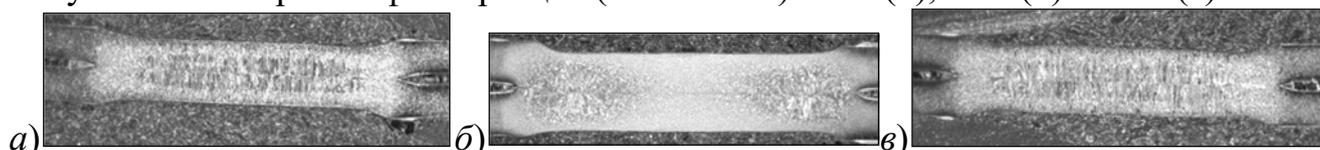


Рисунок 39. Макрошлифы образцов (сталь DP 500): № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в)

Апробацию предлагаемого способа управления сварочным током проводили на многоэлектродных сварочных машинах МСМ 503.618.421 (сварка усилителя внутренней панели задней двери 1118-6201180, толщина 1,5+1,5 мм) и МСМ 503.651.421 (сварка наружной панели задней левой двери 1118-6201013, толщина 0,8+0,8 мм). Первые 500 точек после зачистки электродов выполняли со стабилизацией тока на режимах  $I_2=6,5$  кА,  $t_{св}=20$  пер. (первая деталь) и  $I_2=5,5$  кА,  $t_{св}=17$  пер. (вторая деталь). Последующие точки выполняли по предлагаемому алгоритму (24)...(27). 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.

Реализуемый алгоритм управления предусматривает формирование диаграммы тока сварки в зависимости от сопротивления участка «электрод-электрод» (рис. 40), 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 (рис. 41).

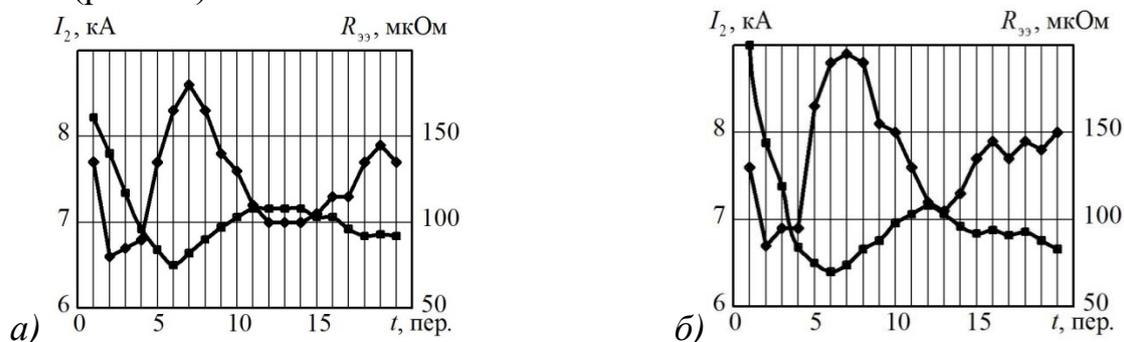


Рисунок 40. Сила вторичного тока  $I_2$  ( $\diamond$ ) и сопротивление  $R_{33}$  участка «электрод-электрод» ( $\square$ ) при сварке по предлагаемому алгоритму после выполнения 500 точек (а); после выполнения 2000 точек (б) (для толщины 1,5+1,5 мм)

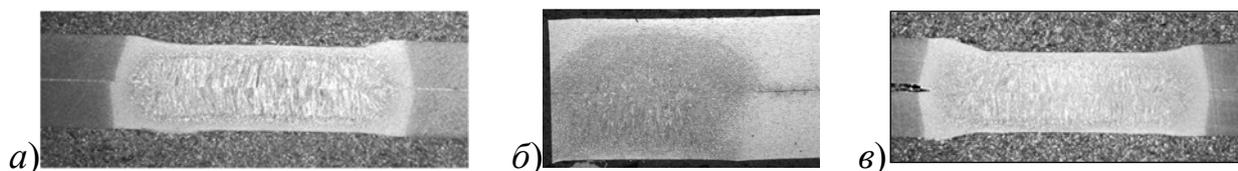


Рисунок 41. Макроструктура сварного соединения при отсутствии возмущений (а); после выполнения 500 точек при стабилизации тока (б); после выполнения 2000 точек по предложенному алгоритму управления (в) (для толщины 1,5+1,5 мм)

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ

1. Повышение стабильности качества контактной сварки при различных возмущениях (колебание напряжения питающей сети, усилия сжатия электродов, изменение условий протекания сварочного тока, износ контактных машин) требует комплексного решения задач моделирования электрических процессов в системе «машина-деталь», оперативной диагностики состояния сварочного оборудования и питающей сети, повышения достоверности определения

энергетических параметров контактной сварки (ток  $I_2$ , динамическое сопротивление  $R_{э}$ , и энерговыделение  $Q_{э}$  между электродами), поиска параметров обратной связи, прогнозирования прочности соединений. Компенсация возмущений при контактной сварке возможна в случае применения адаптивного управления, предусматривающего коррекцию управляющих алгоритмов с учётом состояния сварочного оборудования и питающей сети.

2. Установлено влияние паразитных параметров питающей сети (активное сопротивление  $R_c$  и индуктивность  $L_c$  сети) на стабильность фазового регулирования и достоверность диагностики контактной сварки. Наблюдаемый на осциллограммах тока и напряжения угол открытия тиристоров  $\alpha$  (отсчитывается от точки перехода напряжения  $u_c$  через ноль) превышает фактический угол  $\alpha'$  (отсчитывается от точки перехода напряжения  $u_{c,xx}$  через ноль) на величину  $\Delta\alpha = 0,5 \dots 10$  °эл. При этом погрешность определения энергетических параметров контактной сварки может достигать 10 %. Значение поправки  $\Delta\alpha$  увеличивается при повышении загрузки машины по мощности, уменьшении глубины фазового регулирования и коэффициента мощности машины в режиме сварки.

3. Установлено, что при параметрической стабилизации сварочного тока по напряжению сети, влиянием паразитных параметров сети можно пренебречь, так как действительный уровень нагрева отличается от задаваемого уровня нагрева незначительно, причём, в большую сторону. В то же время, при работе регулятора в режиме поддержания численного значения вторичного тока развиваемый ток равен заданному току только в ключевых точках, которые были использованы для построения регулировочной характеристики. При других углах открытия тиристоров наблюдается уменьшение развиваемого тока относительно заданного. В этом случае следует отдавать предпочтение алгоритмам, корректирующим параметры фазового регулирования в зависимости от измеренного в предыдущем периоде вторичного тока.

4. Установлено, что паразитные параметры (индуктивность  $L_c$  и активное сопротивление  $R_c$ ) сети для известных напряжения сети  $U_{c,xx}$  в режиме холостого хода и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  могут быть определены из опыта короткого замыкания в режиме полнофазного включения по провалу напряжения  $\Delta U$  и скорости нарастания  $\partial I_1 / \partial t$  первичного тока в момент коммутации.

5. Установлено, что достоверная оценка состояния сварочного оборудования и коррекция управляющих алгоритмов возможна по активному  $R_{2к}$  и индуктивному  $X_{2к}$  сопротивлениям в режиме короткого замыкания. Для расчётного определения  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$  по параметрам фазового регулирования (углы открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$  тиристоров), напряжению сети  $U_c$  и вторичному току  $I_2$  предложены характеристики  $k_1 \cos \varphi$  и  $k_1 \sin \varphi$ , которые для заданных  $\alpha$  с высокой точностью могут быть аппроксимированы линейными двучленами. Для  $\alpha = 90$  °эл предложены аппроксимирующие зависимости  $k_1 \cos \varphi = -0,497\lambda + 1,573$  и  $k_1 \sin \varphi = 0,642\lambda - 1,024$ , на области  $\cos \varphi = 0,2 \div 0,8$  позволяющие вести расчёты с точностью 1,5 %.

6. Установлено, что значения  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$  могут быть определены при опыте короткого замыкания и измерении тока во вторичном контуре для двух различных

углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  открытия тиристорov. Множество значений активного  $R_{2к}$  и индуктивного  $X_{2к}$  сопротивлений, при которых для заданного угла  $\alpha$  открытия тиристорov развивается вторичный ток  $I_2$ , представляется в виде изолинии в системе координат  $R_{2к} - X_{2к}$ . Координаты точки пересечения таких изолиний для различных углов  $\alpha$  открытия тиристорov соответствуют искомым значениям  $R_{2к}$  и  $X_{2к}$ . Функцию  $R_{2к} = f(X_{2к})$  предложено аппроксимировать линейным двучленом, в котором коэффициенты рассчитываются в зависимости от угла  $\alpha$  открытия тиристорov, сетевого напряжения  $U_c$ , коэффициента  $K_T$  трансформации и измеренного вторичного тока  $I_2$ . Этот способ, погрешность которого для большинства машин ( $R_{2к} = 50 \div 200$  мкОм,  $X_{2к} = 100 \div 400$  мкОм,  $\cos \varphi = 0,2 \div 0,8$ ) не превышает 5 %, может быть реализован с использованием стандартного измерителя сварочного тока. Для автоматизации построения изолиний предложены номограммы и аппроксимирующие зависимости.

7. Установлено, что при расчётном определении энергетических параметров контактной сварки по результатам измерений со стороны первичной обмотки сварочный трансформатор вносит погрешность порядка 2 % на стационарных машинах. С учётом дальнейшего совершенствования выпускаемого сварочного оборудования магнитными потерями в трансформаторе при электротехнических расчётах можно пренебречь. Однако при сварке на подвесных машинах, многоэлектродных машинах, а также длительно эксплуатируемом оборудовании, магнитные потери увеличиваются и могут достигать 10 % от действующего первичного тока. Потери в сварочном трансформаторе предложено оценивать по мгновенному значению первичного тока в момент окончания импульса тока во вторичном контуре, для чего разработана методика и измерительное оборудование.

8. Расчётное определение коэффициента мощности  $\cos \varphi$  контактной машины в режиме сварки и короткого замыкания может быть выполнено по параметрам фазового регулирования (углы открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$  тиристорov) с точностью до 4% по линейной зависимости  $\cos \varphi = A_1 \lambda + A_0$ . Непосредственное определение угла сдвига фаз  $\varphi$  по известным значениям  $\alpha$  и  $\lambda$  с точностью до 2 °эл. может быть выполнено по линейной зависимости  $\varphi = B_1 \lambda + B_0$ . Коэффициенты  $A_1$ ,  $A_0$ ,  $B_1$  и  $B_0$  вычисляются по предложенным в работе аппроксимирующим многочленам в зависимости от угла  $\alpha$ . Требуемая точность задания  $\alpha$  и измерения  $\lambda$  составляет 0,5 °эл.

9. Коэффициент  $k_i$  регулирования тока, равный отношению действующего вторичного тока к полнофазному току, однозначно определяется по параметрам фазового регулирования ( $\alpha$  и  $\lambda$ ) с использованием предложенной в работе аппроксимирующей зависимости  $k_i = B_2 \lambda^2 + B_1 \lambda + B_0$ , в которой коэффициенты  $B_0$ ,  $B_1$  и  $B_2$  вычисляются по полиномам второй степени в зависимости от  $\alpha$ . При этом погрешность расчётного определения  $k_i$  составляет 3 % для заданных  $\alpha$  и  $\lambda$  с точностью 0,5 °эл.

10. С использованием моделирования электрических процессов в системе «машина-деталь» обоснована возможность уменьшения количества измеряемых параметров при диагностике и управлении контактной сваркой для известных

значений активного  $R_{2к}$  и индуктивного  $X_{2к}$  сопротивлений. В этом случае энергетические параметры контактной сварки рассчитываются по параметрам фазового регулирования (углы открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$  тиристоров). Погрешность расчёта вторичного тока –  $1\div 3\%$ , сопротивления «электрод-электрод» –  $2\div 5\%$ , энерговыделения –  $5\div 10\%$  обеспечивается при точности задания углов  $\alpha$  и  $\lambda$  не менее  $0,5^\circ$ эл. Увеличение глубины фазового регулирования приводит к снижению точности вычислений.

**11.** Установлено, что расчётное определение динамического сопротивления  $R_{ээ}$  участка «электрод-электрод» для измеренных напряжения сети  $U_c$  и вторичного тока  $I_2$  может быть выполнено по параметрам фазового регулирования с использованием регулировочной характеристики  $k_i \cos \varphi$ , которая для произвольного значения  $\alpha$  аппроксимирована трёхчленом  $k_i \cos \varphi = -0,45\lambda - 0,94\alpha + 2,93$ . При этом в диапазоне  $\cos \varphi = 0,4\div 0,9$  и  $\alpha = 60\div 140^\circ$ эл. погрешность вычислений составляет  $5\%$  для погрешности задания  $\alpha$  и  $\lambda = 0,5^\circ$ эл., что позволяет сформулировать требования к аппаратной и программной частям измерительных комплексов.

**12.** Доказана эффективность методов машинного обучения для прогнозирования прочности соединений при контактной сварке как решения задачи классификации. При этом в качестве обобщённого параметра, характеризующего динамическое сопротивление  $R_{ээ}$  и энерговыделение  $Q_{ээ}$  предложено использовать коэффициент  $\operatorname{ctg} \varphi$ , позволяющий отслеживать изменение  $R_{ээ}$  в  $5\div 10$  мкОм при точности задания параметров фазового регулирования  $0,5^\circ$ эл. На основании анализа вектора нормированных значений  $\operatorname{ctg} \varphi$  выбирается наиболее близкий образец из полученной ранее обучающей выборки. Прочность сварного соединения прогнозируется на уровне прочности выбранного образца с погрешностью, не превышающей  $10\%$ .

**13.** Предложено при управлении током сварки оценивать суммарные возмущения по относительному сопротивлению  $\tau_R = R_{ээ}/R_0$ , где  $R_{ээ}$  рассчитывается по параметрам фазового регулирования. Величину тока  $I_2$  следует задавать по относительному току  $\tau_i = I_2/I_0$ , где  $\tau_i = f(\tau_R)$ , а опорные ток  $I_0$  и сопротивление  $R_0$  задают для «эталонной» сварки в отсутствии возмущений. Таким образом, в рамках одной системы управления возможна реализация алгоритмов стабилизации тока, напряжения между электродами и энерговыделения. Предлагаемый комбинированный алгоритм предусматривает при увеличении сопротивления относительно опорного – стабилизацию тока, а при уменьшении сопротивления – стабилизацию энерговыделения. Это позволяет получать стальное качество сварки при отклонениях от номинальных значений напряжения сети –  $0,8\div 1,1$ ; сварочного усилия –  $0,5\div 1,5$ ; диаметра электродов –  $1\div 1,5$ .

**14.** При стабилизации тока поправку  $\Delta\alpha$  угла открытия тиристоров предложено вычислять по отношению заданного тока к измеренному с использованием регулировочной характеристики  $k_i/B_1$ , где  $k_i$  – коэффициент регулирования тока;  $B_1$  – первая производная  $k_i$  по  $\alpha$ . Значение  $k_i/B_1$  вычисляется для параметров фазового регулирования ( $\alpha$  и  $\lambda$ ) в предыдущем периоде как  $k_i/B_1 = A_1\lambda + A_0$  где коэффициенты  $A_1$  и  $A_0$  задаются в зависимости от  $\alpha$  полиномами

второй или третьей степени. Погрешность вычисления  $\Delta\alpha$  составляет 10 % и 5 % соответственно при  $\alpha = 50\div 130$  °эл. и  $\cos\varphi = 0,3\div 0,9$ .

**15.** Эффективность предлагаемых решений доказана на универсальных и специализированных многоэлектродных машинах при контактной точечной сварке деталей кузова автомобиля из низкоуглеродистой стали (08кп, 08Ю, 08ЮП) и сталей повышенной прочности (DP 500) толщиной 0,5÷1,5 мм без защитного покрытия, с электроцинковым и горячецинковым покрытием. Полученные результаты в перспективе могут быть применены к контактной шовной и рельефной сварке, сварке деталей толщиной до 5÷8 мм и сварке алюминиевых сплавов.

**Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:**

1. Способ автоматического управления тепловыделением при контактной точечной сварке / А.С. Климов [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2005. № 3. С. 78–81 (0,44 п.л./0,2 п.л.).

2. Расчёт составляющих комплексного сопротивления сварочного контура контактных машин / А.С. Климов [и др.] // Сварочное производство № 8. 2006. С. 18–20 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

3. Расчётное определение тепловыделения при контактной точечной сварке по измерениям в первичном контуре сварочной машины / А.С. Климов [и др.] // Металлообработка. 2006. № 1. С. 34–36 (0,35 п.л./0,15 п.л.).

4. Расчётное определение коэффициента мощности контактной сварочной машины при осуществлении автоматического управления процессом сварки / А.С. Климов [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2006. № 1. С. 85–88 (0,4 п.л./0,15 п.л.).

5. Построение комплекса компьютерного управления контактной сваркой / А.С. Климов, Н.П. Анциборов, А.А. Герасимов, М.С. Гончаров // Технология машиностроения. 2006. № 2. С. 36–38 (0,4 п.л./0,15 п.л.).

6. Обеспечение качества контактной точечной сварки за счёт стабилизации вторичного тока при износе сварочных электродов / А.С. Климов [и др.] // Сварочное производство. 2007. № 5. С. 10–13 (0,32 п.л./0,2 п.л.).

7. Климов А.С., Потехин В.П., Анциборов А.Н. Математическое моделирование тепловых полей в электродах для точечной сварки // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 1. С. 60–63 (0,6 п.л./0,3 п.л.).

8. Параметрическая стабилизация контактной сварки / А.С. Климов [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 104–109 (0,69 п.л./0,3 п.л.).

9. Микропроцессорное управление контактной сваркой / А.С. Климов [и др.] // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 9. С. 3–10 (0,85 п.л./0,25 п.л.).

10. Измерение составляющих полного сопротивления контактных сварочных машин / А.С. Климов [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 3. С. 107–110 (0,46 п.л./0,2 п.л.).

11. Климов В.С., Климов А.С., Кудинов А.К. Диагностика контактной точечной сварки с использованием нейронной сети Хемминга. Часть. 1.

Измерение сварочного сопротивления / // Вестник машиностроения. 2016. № 10. С. 42-47 (0,7 п.л./0,3 п.л.).

12. Климов В.С., Климов А.С., Кудинов А.К. Диагностика контактной точечной сварки с использованием нейронной сети Хемминга. Часть. 2. Моделирование нейронной сети // Вестник машиностроения. 2016. № 11. С. 32-35 (0,4 п.л./0,15 п.л.).

13. 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./0,3 п.л.)

14. Управление контактной сваркой в условиях возмущений / А.Н. Анциборов [и др.] // Сварочное производство. 2019. № 4. С. 43-45 (0,35 п.л./0,2 п.л.).

15. 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./0,3 п.л.).

16. 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./0,3 п.л.).

17. A computer system for examining and controlling welding processes / A.S. Klimov et all. // Welding International. 2006. vol. 20. pp. 662–664 (0,4 п.л./0,15 п.л.).

18. A method of measuring the heat generation parameters in the resistance spot welding in single phase AC machines / A.S. Klimov et all. // Welding International. 2007. vol. 21. № 5. pp. 380-383 (0,35 п.л./0,15 п.л.).

19. Controlling the quality of resistance spot welding by stabilising secondary current during wear of welding electrodes / A.S. Klimov et all. // Welding International. 2008. vol. 22. № 2. pp. 110-112 (0,35 п.л./0,15 п.л.).

20. A method for measuring current in resistance welding / A.S. Klimov et all. // Welding International. 2013. vol. 27. № 10. pp. 830-833 (0,4 п.л./0,2 п.л.).

21. Current regulation in contact welding / A.S. Klimov et all. // Russian Engineering Research. 2019. № 9. P. 766–771 (0,44 п.л./0,2 п.л.).

22. Measuring the Resistance and Impedance of the Welding Circuit in Contact Machines / A.S. Klimov et all. // Russian Engineering Research. 2019. vol. 39. № 6. pp. 485-491 (0,46 п.л./0,2 п.л.).

23. Monitoring the state of the secondary circuits of contact machines in conditions of mass production / A.S. Klimov et all. // Welding International. 2021. vol. 33. pp. 161-165 (0,44 п.л./0,2 п.л.).

24. Klimov A.S., Kudinov A.K., Klimov V.S. Influence of Grid Parameters on Control and Diagnostics in Resistance Spot Welding // Russian Engineering Research. 2021. № 9. pp. 813–819 (0,42 п.л./0,2 п.л.).

25. Klimov V.S., Klimov A.S., Mkrtychev S.V. Computer diagnostics of resistance spot welding based on Hamming neural network / // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1333. P. 1–6 (0,33 п.л./0,1 п.л.).

26. Климов А.С., Кудинов А.К., Климов В.С. Влияние параметров питающей сети на стабильность фазового регулирования при контактной сварке // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 3 (0,5 п.л./0,2 п.л.)

27. Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества : монография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.

28. Управление процессами и диагностика контактной сварки в условиях массового производства : монография / А.Н. Анциборов, Э.А. Гладков, А.С. Климов. Москва : Инфра-Инженерия, 2023. 160 с.

29. Пат. 2301729 РФ, МПК В23К 11/24. Способ управления процессом контактной точечной сваркой / А.С. Климов, А.А. Герасимов, Н.П. Анциборов, М.С. Гончаров; Заявл. 22.08.05; Оpubл. 27.06.07

30. Пат. 2309030 РФ, МПК В 23 К11/24. Способ управления сварочным током при контактной точечной сварке / А.С. Климов, А.А. Герасимов, Н.П. Анциборов, М.С. Гончаров; Заявл. 20.09.05; Оpubл. 27.10.07.

31. Пат. 2311273 РФ, МПК В 23 К 11/24. Способ автоматического измерения и регулирования тепловыделения при контактной точечной сварке / А.С. Климов, А.А. Герасимов, А.Н. Анциборов, М.С. Гончаров; Заявл. 09.02.2005; Оpubл. 27.11.2007.

32. Пат. 2424095 РФ, МПК В23К 11/24. Способ измерения сопротивления сварочного контакта / А.С. Климов, А.В. Комиренко, В.С. Климов, А.Н. Анциборов. Заявл. 05.11.09; Оpubл. 20.07.11.

33. Пат. 2424096 РФ, МПК В23К 11/24. Способ измерения сварочного тока / А.С. Климов, А.К. Кудинов, В.С. Климов, А.Н. Анциборов; Заявл. 05.11.2009; Оpubл. 20.07.2011.

34. Пат. 2424097 РФ, МПК В23К 11/24. Способ стабилизации тепловыделения при контактной точечной сварке / А.С. Климов, А.В. Комиренко, В.С. Климов, А.Н. Анциборов; Заявл. 05.11.09; Оpubл. 20.07.11.

35. Пат. 2424098 РФ, МПК В23К 11/24. Способ определения коэффициента мощности контактной сварочной машины / А.С. Климов, А.В. Комиренко, В.С. Климов, А.Н. Анциборов; Заявл. 05.11.09; Оpubл. 20.07.11.

36. Пат. 2424099 РФ, МПК В23К 11/24. Способ стабилизации тока контактной сварки / А.С. Климов, А.В. Комиренко, В.С. Климов, А.Н. Анциборов; Заявл. 05.11.09; Оpubл. 20.07.11.

37. Пат. 2457497 РФ, МПК В23К 11/24. Способ измерения сопротивления сварочного контакта / А.С. Климов, А.В. Комиренко, В.С. Климов, А.Н. Анциборов; Заявл. 07.04.11; Оpubл. 27.07.12.

38. Пат. 2507046 РФ, МПК В23К 11/24. Способ стабилизации тока контактной сварки / А.В. Комиренко, А.С. Климов, В.С. Климов; Заявл. 10.09.12; Оpubл. 20.02.14.