На правах рукописи

КЛИМОВ Виталий Сергеевич

ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Специальность 05.02.11 – Методы контроля и диагностики в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2013 г.

Работа выполнена в Тольяттинском государственном университете

Научный руководитель: **ДРАЧЕВ Олег Иванович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **ГЛАДКОВ Эдуард Александрович,**
доктор технических наук, профессор
МГТУ им. Н.Э.Баумана

ДОРОХОВА Елена Германовна,
кандидат технических наук,
ОАО «НИКИЭТ», с.н.с.

Ведущая организация: Московский государственный индустриальный университет (**МГИУ**), г. Москва

Защита диссертации состоится «30» мая 2013 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баум

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан « ____ » _____2013 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2029109
Климов В.С. Диагностика к

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.01,
доктор технических наук, доцент А.В. Коновалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Контактная точечная сварка широко распространена в различных отраслях машиностроения в качестве основного процесса для соединения листового материала. В настоящее время на эту технологию приходится более 30% от общего объема производства сварных конструкций.

Среди различных типов контактных сварочных машин однофазные сварочные машины промышленной частоты являются наиболее распространенными за счёт простоты оборудования и аппаратуры управления. При этом основными параметрами процесса контактной сварки являются величина тока сварки, силы сжатия электродов и время сварки. Для поддержания этих величин на нужном уровне применяются системы управления со стабилизацией режимов сварки. Однако применение таких систем управления не может гарантировать отсутствие дефектов в получаемых соединениях, так как процесс контактной сварки проходит под действием таких многочисленных возмущений, как ток шунтирования, колебание напряжения питающей сети, различная степень подготовки поверхности свариваемых деталей, изменение активного и индуктивного сопротивлений сварочной машины, несоосность электродов и их износ. Из-за случайного характера данных возмущений качество сварки становится нестабильным.

Вопросам диагностики качества контактной сварки в реальном времени посвятили свои работы Б.Е. Патон, Н.В. Подола, В.С. Гавриш, И.О. Скачков, А.Е. Пирумов, С.Ю. Максимов, Е.А. Прилипко, Y.J. Park, H.S. Cho, A. Aravinthan, M. El-Banna, P. Laurinen, K. Sivayoganathan, J. Röning и др.

Необходимость оценки качества всех точечносварных соединений в реальном масштабе производственного времени с целью выявления дефектных соединений - является крупной проблемой в области машиностроительного производства. Поэтому исследованиям, направленным на ее решение, уделяется внимание в крупнейших промышленных корпорациях: WeldComputer Corporation (США), Nissan Motor Company (Япония), Lockheed Martin Energy Research Corporation (США), General Motors Corporation (США) и др.

Цели и задачи работы. Целью работы является снижение риска пропуска дефектных соединений путем создания надежного способа диагностики качества сварных соединений в реальном времени и легкореализуемого в промышленной среде. Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Путем математического моделирования электрических процессов контактной сварки оценена возможность использования параметров работы тиристорного контактора для диагностики контактной сварки.
2. Разработан алгоритм диагностики сварного соединения на основе параметров работы тиристорного контактора.
3. Разработан и изготовлен аппаратно-программный комплекс, способный реализовать предложенный алгоритм диагностики контактной сварки.

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
Библиотека

4. Проведены экспериментальные исследования в условиях действия различных возмущений и оценка применимости полученных решений в производстве и научных исследованиях.

Методы исследования. Математическое моделирование электрических процессов сварочной машины проводилось с использованием программного пакета MathCAD. Для моделирования нейронной сети Хэмминга автором работы было использовано собственное программное обеспечение – SW Neural Net. Экспериментальные исследования проводились на модернизированных контактных сварочных машинах МТПУ-300 и МТПК-25-1 (производства «Электрик», г. Ленинград, СССР) с использованием разработанной автором автоматизированной системы управления и диагностики контактной сваркой СК-300 (производства ООО «Дельта-техник», г. Тольятти, Россия) и с применением регистратора сварки РКДП-0401 (производства ООО «Многофункциональный инженерный центр», г. Санкт-Петербург, Россия).

Научная новизна работы заключается в следующем:

- установлена взаимосвязь между углом фазовой отсечки и величиной отклонения сварочного тока под действием различных возмущений;
- теоретически и экспериментально доказана чувствительность параметров работы тиристорного контактора (угол открытия тиристоров и длительность их включенного состояния) к влиянию всех возмущений действующих на процесс контактной сварки;
- впервые доказано, что нейронную сеть Хэмминга можно применять при диагностике контактной сварки для выявления сварных соединений не соответствующих заданным критериям качества;
- установлена взаимосвязь между параметрами нейронной сети Хэмминга и точностью ее функционирования при предсказывании прочностных характеристик соединения по динамике изменения коэффициента мощности в процессе сварки.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- создан новый способ интеллектуальной диагностики контактной сварки, который позволяет проводить неразрушающий контроль точечносварных соединений в реальном масштабе производственного времени. Данный способ позволяет повысить качество сварных узлов за счет снижения риска пропуска дефектной сварки;
- открытое в результате исследования свойство чувствительности параметров работы тиристорного контактора в масштабах одного периода сварки к некоторым возмущающим воздействиям может быть использовано для компенсации этих возмущений в последующих периодах, что и было реализовано при создании серии запатентованных способов стабилизации процесса контактной сварки;
- свойство чувствительности параметров работы тиристорного контактора в масштабах всей сварки к действию возмущений может быть использовано при создании систем диагностики контактной сварки;

- разработан алгоритм кодирования информации об изменении диагностического признака в биполярные сигналы, позволяющий внедрять в управление и диагностику техпроцессов нейронные сети с двухуровневым типом входных сигналов.

Результаты исследований внедрены в автомобильную промышленность, что подтверждено актами о внедрении на предприятиях ООО «Беко Лада 1», ООО «Промрегион», ОАО «АВТОВАЗ».

Апробация работы. Результаты работы были доложены и обсуждены на следующих всероссийских и международных конференциях: IX Всероссийская школа-конференция молодых ученых "КоМУ-2011" (Ижевск, 2011); III Международная научно-техническая конференция "Резниковские чтения" (Тольятти, 2011); Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2009» (Москва, ВВЦ, 2009); Всероссийский смотр-конкурс научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2009» (Новочеркасск, 2009); Всероссийская научно-техническая конференция с элементами научной школы для молодежи «Научных исследований в области машиностроения» (Тольятти, 2009); Всероссийский смотр-конкурс научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2008» (Новочеркасск, 2008); IV Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2008).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 11 работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, получено 3 патента РФ на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из аннотации, введения, 4 глав, выводов по работе, списка использованной литературы и приложений. Работа содержит 131 страниц. В том числе 59 рисунков и 6 таблиц, список литературы из 112 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы.

В первой главе выполнен обзор литературных источников, посвящённых диагностики контактной сварки, представлен анализ современного состояния исследований в данной области, сформулированы задачи работы.

При анализе литературных источников было установлено, что с развитием в кибернетике технологий искусственного интеллекта (в частности, нейронных сетей) начал сформировываться отдельный класс неразрушающих систем диагностики качества, способных предсказывать прочностные характеристики соединения по динамике изменения в процессе сварки косвенных параметров. Однако внедрение существующих разработок в реальное производство затруднено из-за: 1) необходимости модернизации сварочного оборудования под установку требуемых датчиков; 2) высокой трудоемкостью настройки данных систем диагностики.

Первый недостаток предложено преодолеть путем диагностики качества сварки по параметрам, простым для измерения, не требующим установку в сварочную машину дополнительных датчиков. К таким параметрам относятся угол поджига тиристоров и длительность их включенного состояния. Автором выдвинута гипотеза, что диагностику качества сварки можно производить путем наблюдения за работой тиристорного контактора в процессе сварки. Для подтверждения данной гипотезы было необходимо исследовать реакцию тиристорного контактора на возмущения контактной сварки.

Для преодоления второго недостатка в качестве механизма анализа данных об изменении диагностического признака в алгоритме оценки качества сварки было предложено использование нейронной сети Хэмминга, выгодно отличающейся от других сетей простотой настройки. То есть, вторая гипотеза, выдвинутая автором – возможность на основе нейронной сети Хэмминга построения надежных систем диагностики контактной сварки.

Во второй главе приведены результаты исследования влияния вредных возмущающих воздействий на формирование точечного сварного соединения. Также была исследована возможность использования параметров работы тиристорного контактора для оценки влияния этих возмущений в процессе сварки и по ее окончанию.

Исследование чувствительности параметров работы тиристорного контактора к возмущающим воздействиям проводилось путем математического моделирования электрических процессов при сварке в программном пакете MathCAD. При этом использовалась схема замещения сварочной машины, состоящая из последовательно включенных активных сопротивлений сварочного контура R_{2k}, сопротивления участка «электрод-электрод» $R_{ээ}$ и индуктивности L, подключенных к напряжению U_c питающей сети через два встречно-параллельных тиристора. В этом случае, для данного угла α открытия тиристоров, осциллограмму тока в сварочном контуре можно рассчитать как сумму принужденного $i_{пр}$ и свободного токов $i_{св}$ (1):

$$i_2 = i_{пр} + i_{св} = I_{\max}\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I_{\max}\sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{R_{2k}+R_{ээ}}{L}t}, \qquad (1)$$

где I_{max} – амплитудное значение тока, которое при данном коэффициенте трансформации K_m, можно определить по (2):

$$I_{\max} = \frac{U_c\sqrt{2}/K_m}{\sqrt{(R_{ээ}+R_{2k})^2+(\omega L)^2}} \qquad (2)$$

На изменение сопротивления R_{2k} сварочного контура влияют такие возмущения как нагрев и износ токоведущих частей сварочной машины. Значение сопротивления $R_{ээ}$ участка «электрод-электрод» может колебаться вследствие изменения толщины листов, степени подготовки их поверхностей, а также из-за колебания давления в пневмосистеме привода сжатия. С помощью равенства (1) получена диаграмма, описывающая ослабляющее влияние на ток сварки возмущающих воздействий, приводящих к изменению сопротивлений R_{2k} и $R_{ээ}$ для различных значений угла α открытия тиристоров (рис. 1). Данная

диаграмма позволила сделать практически значимый вывод о возможности минимизации данного возмущения путем выбора угла α при фазовом управлении сваркой из диапазона 80..130 эл. град.

Изменение индуктивного сопротивления X_{2k} сварочного контура возникает при введении контур ферромагнитных масс, при сварке изделий надеваемых на хобот сварочной машины. Построена контурная диаграмма, позволяющая описать ослабляющее влияние на ток сварки данного возмущающего воздействия (рис. 2). Диаграмма позволила сделать практически значимый вывод о необходимости отказа от глубокофазного регулирования тока (отказ от выбора α>80 эл. град) при управлении процессом контактной сварки в условиях действия данных возмущений.

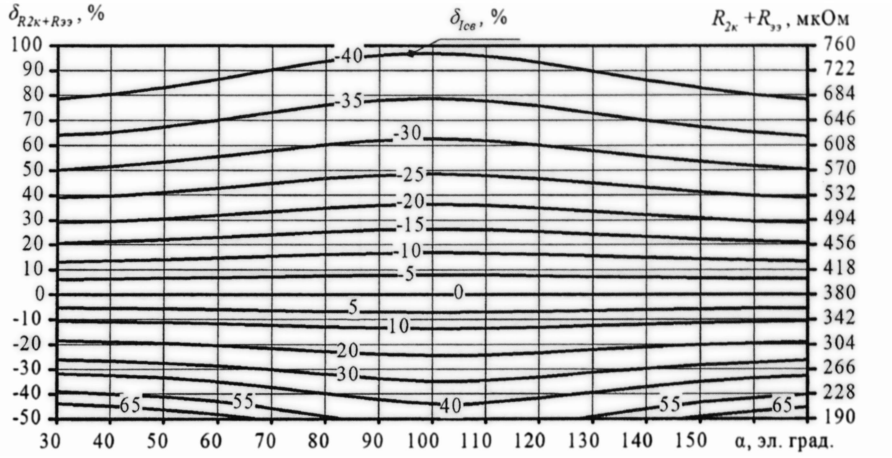


Рис.1. Контурная диаграмма, показывающая отклонение $\delta_{Iсв}$ тока сварки, вызванное увеличением суммы сопротивлений $R_{2к} + R_{эз}$ на $\delta_{R2к+Rэз}$ процентов при различных углах α открытия тиристоров

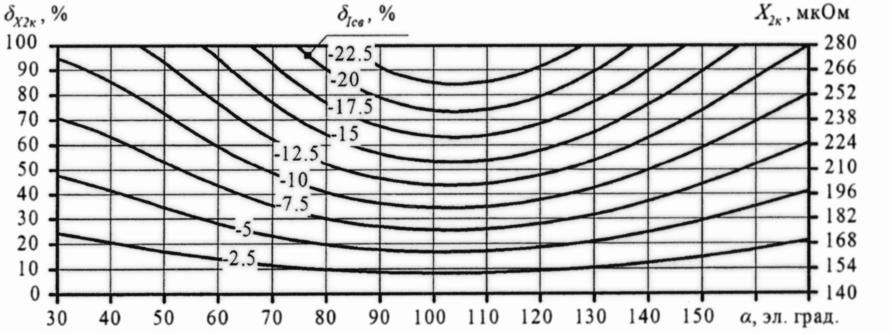


Рис. 2. Контурная диаграмма, показывающая отклонение $\delta_{Iсв}$ тока сварки вызванное увеличением сопротивления $X_{2к}$ сварочного контура на $\delta_{X2к}$ процентов при различных углах α открытия тиристоров

Смоделированные осциллограммы сварочного тока (рис. 2 а) наглядно демонстрирует, что под действием возмущений, приводящих к изменению сопротивлений R_{2k}, $R_{ээ}$ и X_{2k} при одном и том же значении угла α происходит изменение длительность λ включенного состояния тиристоров. Это доказывает чувствительность параметров работы тиристорного контактора к данным возмущениям в масштабе одного периода сварки.

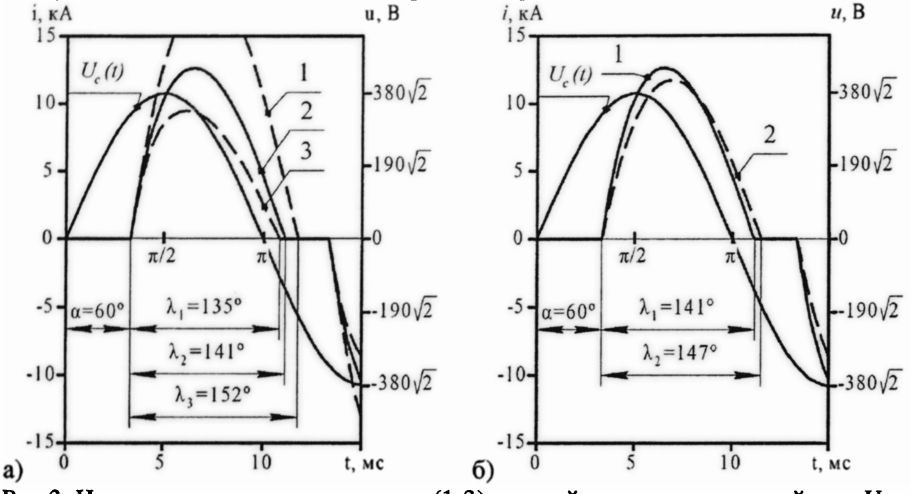


Рис 3. Изменение осциллограмм тока (1-3) под действием возмущений, где U_c – напряжение питания сети, α – угол открытия тиристоров, λ – длительность их включенного состояния: а) исходная осциллограмма тока (2) при $R_{2к}+R_{ээ}$=380 мкОм, осциллограмма тока (1) при уменьшении $R_{2к}+R_{ээ}$ на 40%, осциллограмма тока (3) при уменьшении $R_{2к}+R_{ээ}$ на 40%; б) исходная осциллограмма тока (1) при $X_{2к}$=140 мкОм, осциллограмма тока (2) при уменьшении $X_{2к}$ на 40%

Дальнейшие исследования показали, что оценить влияние таких возмущающих воздействий как колебание напряжения питания сети, шунтирование сварочного тока и износ сварочного тока в масштабах одного периода сварки по параметрам работы тиристорного контактора не представляется возможным.

В масштабах всей сварки влияния любых возмущающих воздействий приводит к изменению плотности тока, протекающего через сварное соединение, в этом случае меняется тепловыделение за единицу времени в сварной зоне, а следовательно и динамика процесса зарождения и роста литого ядра соединения. Чувствительность параметров работы тиристорного контактора в масштабах всей сварки к изменению плотности сварочного тока доказана автором экспериментально.

Ценность полученных результатов, которые представлены в таблице 1, заключается в том, что свойство чувствительности параметров работы

тиристорного контактора к возмущающим воздействиям в масштабах одного периода сварки можно использовать для компенсации этих возмущений в последующих периодах.

Таблица 1.

Результаты исследования чувствительности параметров работы тиристорного контактора к влиянию различных возмущающих воздействий (знак «+» обозначает «чувствителен», знак «–» обозначает «нечувствителен»)

	Чувствительность параметров работы тиристорного контактора к возмущающим воздействиям	
	в масштабе одного периода сварки	в масштабе всей сварки
Изменение активного сопротивления сварочного контура	+	+
Изменение индуктивного сопротивления сварочного контура	+	+
Изменение сопротивления свариваемых деталей	+	+
Колебание напряжения питания сети	–	+
Влияние тока шунтирования	–	+
Износ сварочных электродов	–	+
Колебание усилия сжатия электродов	–/+	+

А свойство чувствительности параметров работы тиристорного контактора к любым возмущающим воздействиям в масштабах сварки можно использовать для оценки качества полученного соединения.

В качестве диагностического признака основанного на измерении параметров работы тиристорного контактора (угла α поджига тиристоров и длительности их включенного состояния λ) предложено использовать коэффициент мощности сварки $cos\varphi$, который для каждого периода сварки можно рассчитывать путем решения равенства (3) относительно φ:

$$\sin(\lambda+\alpha-\varphi)/\sin(\alpha-\varphi)=\exp(-\lambda\, ctg\varphi) \qquad (3)$$

Путем вычислительного эксперимента установлено, что достаточная точность определения $cos\varphi$ (относительная погрешность $\delta_{cos\varphi}$=5%) по равенству (3) достигается при измерении α и λ с точностью Δ=0,5 электрических градусов.

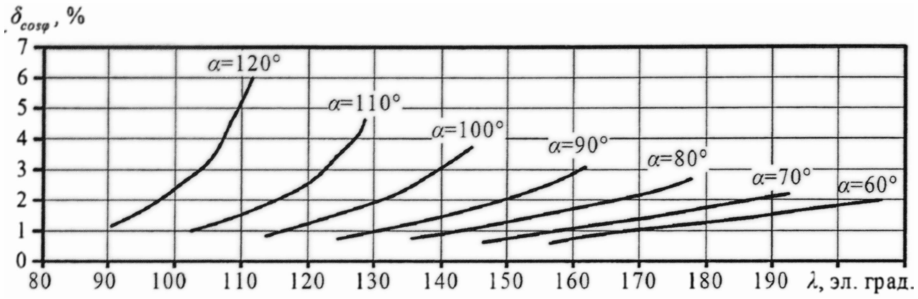


Рис. 4. Относительная погрешность $\delta_{cos\varphi}$ определения $cos\varphi$ при измерении α и λ с точностью Δ=0,5 электрических градусов

<u>В третьей главе</u> исследована возможность определения прочностных характеристик сварных соединений с помощью нейронной сети Хэмминга по динамике изменения параметров работы тиристорного контактора в процессе сварки.

Предложенный алгоритм диагностики сварки состоит из следующих этапов: На первом этапе производят экспериментальную сварку образцов на различных значениях сварочного тока. В процессе сварки в каждом сварочном периоде проводят измерение угла α включения тиристоров и длительности λ их включенного состояния, с помощью которых рассчитывают коэффициент cosφ мощности для всех периодов. В результате, на данном этапе получают соединения, сваренные при различной плотности тока, и соответствующие им диаграммы изменения коэффициента мощности $cos\varphi$ в процессе сварки.

На втором этапе проводят проверку полученных сварных соединений на их соответствие необходимым критериям качества, таким, например, как геометрические размеры соединения, прочностные характеристики при статических или динамических режимах нагрузки. Конечным результатом данного этапа является сопоставление диаграмм изменения коэффициента мощности $cos\varphi$ в процессе сварки с характеристиками соединений, при которых они были получены.

На третьем этапе осуществляют диагностику необходимых сварных соединений. Для этого в процессе сварки измеряют параметры работы тиристорного контактора, с помощью которых рассчитывают коэффициент $cos\varphi$ мощности для всех периодов сварки. Получившуюся диаграмму изменения коэффициента $cos\varphi$ мощности сварки сравнивают с диаграммами, полученными при экспериментальной сварке для поиска наиболее похожей. Принимают, что у исходного соединения такие же характеристики, как и у экспериментального соединения с наиболее похожей диаграммой.

Так как разрабатываемый алгоритм планируется использовать для диагностики сварных соединений из различных материалов, то он должен обладать требуемой для этого универсальностью. Изучение особенностей диаграмм коэффициента мощности сварки для различных сочетаний

свариваемых материалов, форм электродов, режимов сварки с учетом появления все новых и новых материалов является слишком трудоемкой и длительной задачей. Решение этой объемной задачи предлагается возложить на искусственный интеллект с помощью применения нейронной сети Хэмминга, которая обладает возможностью обучения на основе опыта и обобщения предыдущих прецедентов на новые случаи.

Для помещения в память нейронной сети информации о шаблонах изменения диагностического признака необходимо провести ее обучение, которое заключается в расчете весовых коэффициентов $\omega_{i,j}$ первого слоя (4):

$$\omega_{i,j} = -X_i^j, \quad i = 1...n, \; j = 1...m, \tag{4}$$

где n - размерность входного сигнала, m – количество шаблонов сигнала.

Весовые коэффициенты тормозящих синапсов во втором слое равны величине ε, взятой с отрицательным знаком (отрицательная обратная связь). Значение ε выбрано в соответствии с неравенством (5):

$$0 < \varepsilon < \frac{1}{m}. \tag{5}$$

Вес синапса нейрона второго слоя, связанного с его же аксоном, равен 1 (положительная обратная связь). В процессе функционирования на вход нейронный сети подается неизвестный сигнал X_i, исходя из которого, рассчитывается состояние аксонов нейронов первого слоя $y_j^{(1)}$ (6):

$$y_j^{(1)} = \sum_{i=1}^{n} \omega_{ij} X_i + \frac{n}{2}, \quad j = 1...m \tag{6}$$

Далее полученные значения $y_j^{(1)}$ инициализируют значения $y_j^{(2)}$ аксонов второго слоя (7):

$$y_j^{(2)} = y_j^{(1)}, \quad j = 1...m \tag{7}$$

Затем проводится расчет состояния синапсов $s_j^{(1)}$ нейронов второго слоя (8):

$$s_j^{(2)}(p+1) = y_j^{(2)}(p) - \varepsilon \sum_{i=1}^{m} y_i^{(2)}(p), \quad i \neq j, i = 1...n, j = 1...m, \tag{8}$$

где p – номер итерации функционирования нейронной сети.

Выходной сигнал с каждого нейрона второго слоя, определяется через активационную функцию f (9):

$$y_j^{(2)}(p+1) = f[s_j^{(2)}(p+1)], \quad j = 1..m, \tag{9}$$

где $f(x)$ – активационная функция с порогом F (10):

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & 0 \le x < F \\ F, & x \ge F \end{cases} \tag{10}$$

Порог F на выбирается равным количеству m шаблонов.

При дальнейшем функционировании сети выходные сигналы со второго слоя нейронов проверяются на наличия в них изменений за последнюю итерацию. Если выходные сигналы изменились, то они подаются с помощью обратной связи на входы второго слоя нейронов. С этого момента начинается

следующая итерация функционирования сети и в соответствии с равенствами (6) и (7) рассчитываются новые выходные сигналы. Если выходные сигналы второго слоя нейронов за последнюю итерацию не изменились, то они передаются на выход *Y* нейронной сети (11):

$$Y_j = y_j^{(2)}, \quad j = 1...m \tag{11}$$

Номер нейрона в выходном слое *Y*, значение сигнала которого отлично от нуля, соответствует номеру шаблона диаграммы наиболее близкого к входному сигналу *X*.

Сеть Хэмминга умеет принимать данные, представленные только в виде биполярного вектора, компоненты которого принимают значения либо «-1», либо «+1», поэтому автором разработан механизм кодирования информации об изменении диагностического признака в процессе сварки. Предложено расположить нейроны входного слоя *X* в виде сетки с размерностью *a* столбцов и *b* строк (рис 5). При наложении сетки входных нейронов на диаграмму изменения *cosφ* в процессе сварки в ней активизируется часть нейронов, которые взаимодействуют с данной диаграммой (рис 6 а). Активизированные нейроны входного слоя *X* хранят и передают в нейронную сеть по каналам связи сигнал со значением «+1», остальные нейроны входного слоя хранят и передают сигнал со значением «-1». Для удобства зрительного восприятия состояния входов сети, активированные нейроны представлены в виде квадратов закрашенного в черный цвет, а не активированные нейроны в виде белых квадратов (рис 6 б).

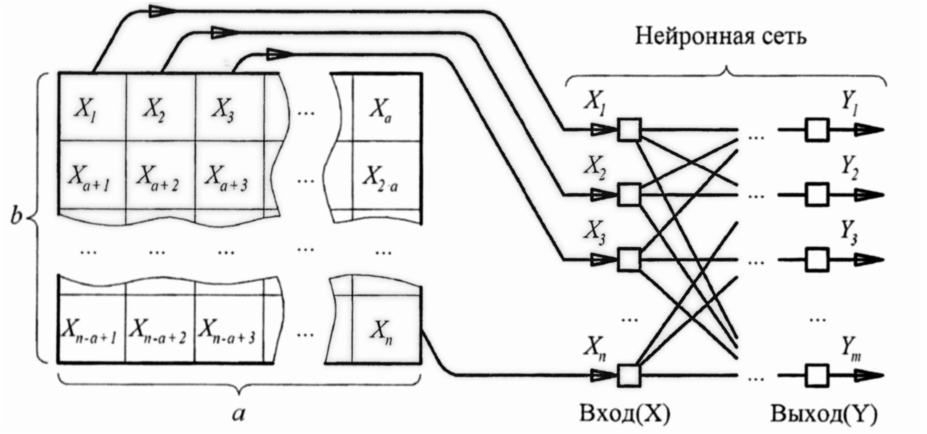


Рис. 5. Механизм кодирования информации об изменение диагностического признака в биполярные сигналы

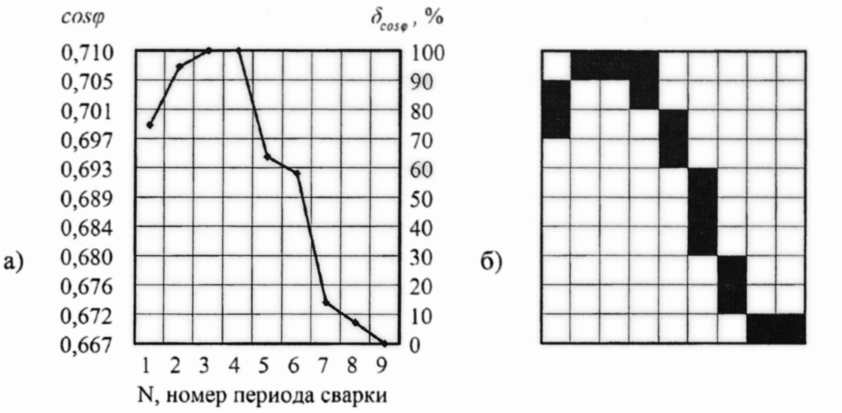


Рис. 6. Диаграмма изменения *cosφ* в процессе сварки, отложенная по относительной шкале $\delta_{cos\varphi}$ (а) и ее биполярное представление (б)

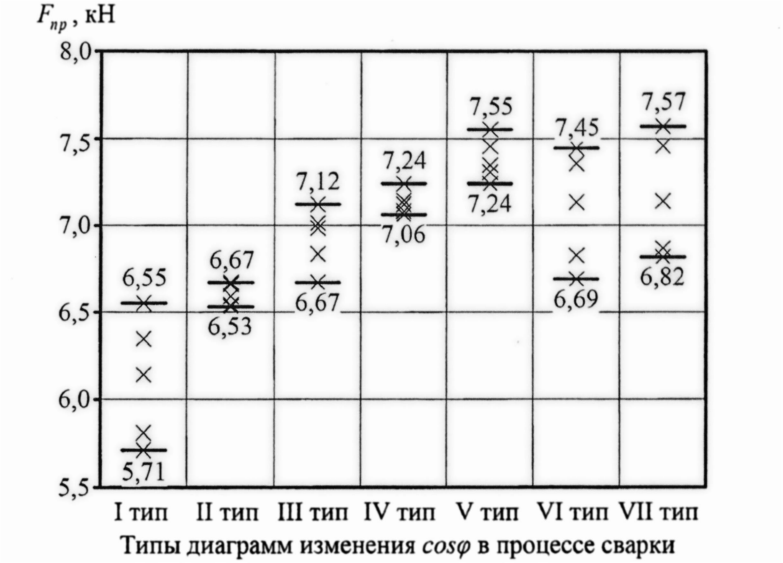


Рис. 7. Результаты механических испытаний по определению разрушающего усилия $F_{пр}$, полученных при экспериментальной сварке соединений (каждый знак “x” соответствует отдельному результату экспериментов)

Экспериментальная апробация предложенного алгоритма диагностики осуществлялась на примере сварки пакета заготовок из стали 08кп толщиной 08+08 мм. Сначала была произведено по 5 сварок заготовок на значениях сварочного тока от 6,5 кА до 9,5 кА с шагом 0,5 кА. В результате предварительных экспериментов для каждого из 7 значений тока была

получена определённая диаграмма динамики изменения $cos\varphi$ в процессе сварки. Полученные сварные соединения были протестированы на разрывной машине для определения их разрушающего усилия $F_{пр}$ (рис 7).

Полученные 7 типов диаграмм коэффициента мощности $cos\varphi$ сварки использовались в качестве шаблонных сигналов для обучения нейронной сети. При этом обученная нейронная сеть призвана сравнивать диаграмму изменения $cos\varphi$ диагностируемой сварки с шаблонами, хранящимися в памяти сети, и определять наиболее близкий шаблон диаграммы $cos\varphi$ (табл. 2). Предполагается, что прочностные характеристики текущего сварного соединения соответствуют диапазону значений $F_{пр}$ наиболее близкого шаблона динамики изменения $cos\varphi$ в процессе сварки.

Проверка точности функционирования сети по определению разрушающего усилия $F_{пр}$ соединения проводилась на 46 сварках при случайно выбранных значениях сварочного тока. В 42 случаях прочностные характеристики сварных соединений были предсказаны нейронной сетью верно. В 4 других случаях абсолютная погрешность находилась в пределах 180 Н (~2,5%), что также является удовлетворительным результатом.

Исследование точности функционирования нейронной сети показали, что оптимальное количество столбцов a сетки входных нейронов равно количеству периодов сварки, при этом количество строк следует выбирать из диапазона от 5 до 38.

В четвертой главе была исследована возможность практической реализации предложенного алгоритма диагностики контактной сварки.

Показано, что предложенный алгоритм диагностики контактной сварки можно реализовать с помощью средств разработки программного обеспечения и общедоступных аппаратных компонентов (рис. 8).

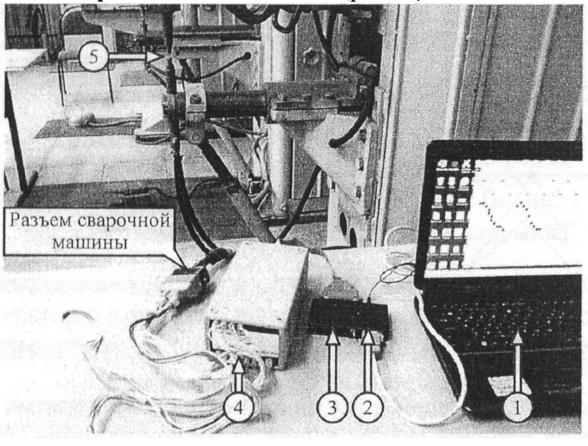
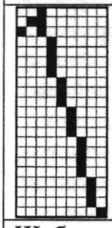
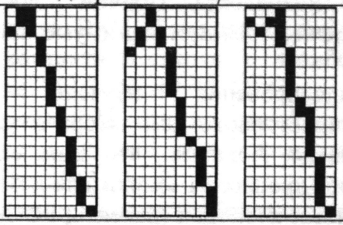
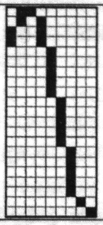
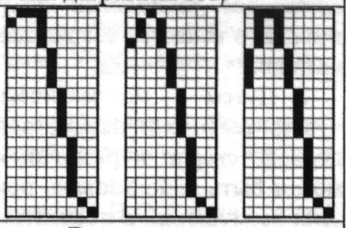
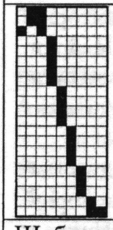
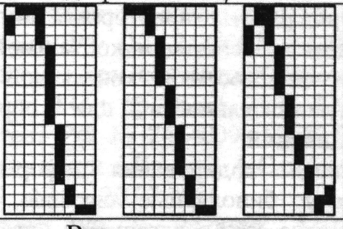
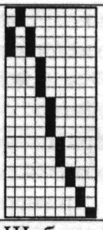
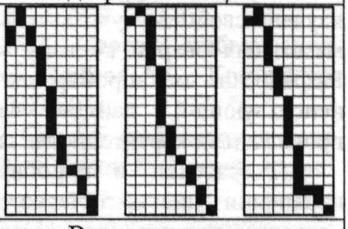
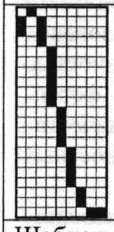
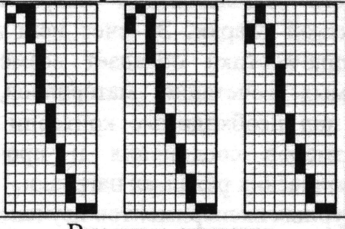
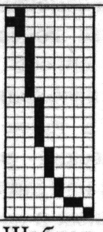
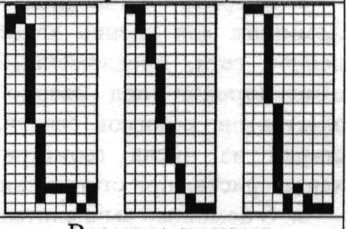
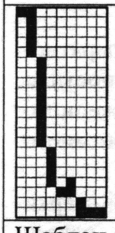
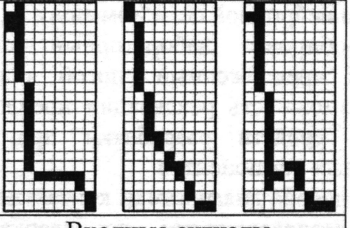


Рис 8. Лабораторная установка для реализации предложенного алгоритма диагностики контактной сварки, состоящая из ноутбука (1), контроллера (2), модуля питания и согласования уровней (3), блока согласования интерфейсов (4), контактной сварочной машины (5).

Таблица 2.

Примеры классификации сигналов, поданных на вход нейронной сети, к шаблонам диаграмм, хранящихся в ее памяти

I тип даграммы cosφ		II тип даграммы cosφ	
			
Шаблон	Входные сигналы	Шаблон	Входные сигналы
III тип даграммы cosφ		IV тип даграммы cosφ	
			
Шаблон	Входные сигналы	Шаблон	Входные сигналы
V тип даграммы cosφ		VI тип даграммы cosφ	
			
Шаблон	Входные сигналы	Шаблон	Входные сигналы
VII тип даграммы cosφ			
			
Шаблон	Входные сигналы		

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведенный анализ литературных данных позволяет заключить, что дальнейшее совершенствование систем диагностики контактной сварки может быть осуществлено поиском новых диагностических признаков и внедрением в алгоритмы технологий искусственного интеллекта. Причем достоверные выводы о качестве сварки должны обеспечиваться при минимуме измеряемых величин.

2. Путем математического моделирования изучено свойство чувствительности параметров работы тиристорного контактора в масштабах периода сварки к различным возмущениям. Показано, что данное свойство может быть использовано при управлении процессом сварки для компенсации этих возмущений в последующих сварочных периодах (патенты РФ №2424097 и №2424099).

3. Путем натурных экспериментов и математического моделирования изучено свойство чувствительно параметров работы тиристорного контактора в масштабах сварки ко всем возмущающим воздействиям контактной сварки. Разработан и апробирован алгоритм диагностики контактной сварки, использующий данное свойство чувствительности для определения прочностных характеристик сварных соединений.

4. Разработан и апробирован механизм кодирования информации об изменении диагностического признака в биполярные сигналы, который позволяет внедрять рекуррентные нейронные сети в алгоритмы управления и диагностики техпроцессов.

5. Впервые установлена возможность использования нейронной сети Хэмминга для оценки качества контактной сварки. За счет использования данной сети, предложенный способ диагностики обладает возможностью самонастройки под сварку необходимых сочетаний материалов, формы электродов, режимов сварки, а также под необходимые критерии качества сварки из числа геометрических размеров соединения и прочностных характеристик при статических или динамических режимах нагрузки.

6. С помощью вычислительных и натурных экспериментов изучено влияние параметров нейронной сети Хэмминга на точность ее функционирования при диагностике сварки. Разработаны рекомендации для достижения максимальной точности диагностики сварки с помощью нейронной сети Хэмминга.

7. Разработан, изготовлен и апробирован лабораторный аппаратно-программный комплекс, реализующий предложенный способ диагностики контактной сварки. Это доказывает возможность реализации предложенного алгоритма диагностики с помощью средств разработки программного обеспечения и общедоступных аппаратных компонентов.

8. Состоятельность предложенного способа диагностики контактной сварки подтверждена экспериментальными исследованиями по сварке пакета заготовок толщиной 0,8+0,8 мм из стали 08кп. В качестве критерия качества использовано предельное усилие разрушения сварного соединения, которое с

помощью разработанной системы диагностики контактной сварки для всех полученных соединений было предсказано правильно.

Основные положения диссертационного исследования опубликованы в работах:

1. Климов В.С., Комиренко А.В. Адаптивный алгоритм стабилизации процесса контактной сварки // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 12. С. 41–45.

2. Климов В.С., Комиренко А.В. Применение нейросетевых технологий распознавания образов для диагностики контактной сварки // Сварка и Диагностика. 2013. № 2.

3. Параметрическая стабилизация контактной сварки / В.С. Климов [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 104-109.

4. Микропроцессорное управление контактной сваркой / В.С. Климов [и др.] // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 9. С. 3-10.

5. Патент РФ № 2424097, МПК B23K 11/24. Способ стабилизации тепловыделения при контактной точечной сварке / Климов А.С., Комиренко А.В., Климов В.С. и др., заявл. 05.11.2009, опубл. 20.07.2011.

6. Патент РФ № 2424099, МПК B23K 11/24. Способ стабилизации тока контактной сварки / Климов А.С., Комиренко А.В., Климов В.С. и др., заявл. 05.11.2009, опубл. 20.07.2011.

7. Патент РФ № 2424098, МПК B23K 11/24. Способ определения коэффициента мощности контактной сварочной машины / Климов А.С., Комиренко А.В., Климов В.С. и др., заявл. 05.11.2009, опубл. 20.07.2011.