

На правах рукописи

КОСТЮКОВА Анастасия Петровна

**СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПО ДИАГНОСТИРОВАНИЮ СОСТОЯНИЯ ИНДУКЦИОН-
НЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

**Специальность: 05.13.01 –
Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО
«Уфимский государственный авиационный технический университет»
на кафедре вычислительной техники и защиты информации

Научный руководитель	д-р техн. наук, проф. Гузаиров Мурат Бакиевич зав. кафедрой теоретических основ электро- техники, ректор Уфимского государственного авиационного технического университета
Официальные оппоненты	д-р техн. наук, проф. Юсупова Нафиса Исламовна декан факультета информатики и робототехники, зав. кафедрой вычислитель- ной математики и кибернетики Уфимского го- сударственного авиационного технического университета
	канд. техн. наук, доц. Конесев Сергей Геннадиевич доц. кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфим- ского государственного нефтяного техниче- ского университета
Ведущая организация	ФГУП научное конструкторско- технологическое бюро "Вихрь"

Защита состоится 23 июня 2011 года в 10-00 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, г.Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан 19 мая 2011 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.



В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Плавка в индукционных плавильных установках (ИПУ) является одним из наиболее эффективных способов переработки материалов и сплавов вследствие таких своих достоинств как универсальность по отношению к выплавляемым металлам и плавильным операциям, высокая производительность, экономичность и низкие требования по качеству шихты, хорошая управляемость, высокая гигиеничность и малое загрязнение воздуха.

В настоящее время эффективность процесса плавки в индукционных плавильных установках (ИПУ) по объему выплавленного металла, потребляемой энергии и другим параметрам энергоэффективности в значительной мере зависит от совершенства технологии плавки и состояния оборудования, что связано с использованием систем мониторинга состояния, предупреждения аварийных ситуаций, сбора статистической информации для анализа производственного процесса. Современное развитие таких систем включает два направления: робототизированные управляющие комплексы и системы диагностирования. Первый подход, рассматриваемый в основном в США и Японии, предполагает как можно более полное исключение человеческого фактора из производственного процесса через автоматизацию большинства производственных операций. Вторым подходом, используемым в основном в европейских странах, например, в Германии и Швеции (фирмами *OTTO JUNKER* и *ABB*), предполагает автоматизацию лишь основных плавильных операций, чаще всего загрузки шихты и извлечения тигля, при этом большее внимание уделяется диагностике ИПУ с применением различных (термоэлектрических или оптических) методов диагностики, идентификации и мониторинга.

Предпочтения российских предприятий, занимающихся плавкой металлов, сводятся ко второму подходу, полная автоматизация на них считается излишней, но полностью осознается необходимость своевременного ремонта и предупреждения о прогаре футеровки. Исследование таких систем показало, что они предотвращают менее 55 % аварий, что не удовлетворяет современным требованиям. Системы диагностирования используют усредненные измерения параметров, характеризующих состояние ИПУ, при этом равномерное изменение толщины футеровки, часто регистрируемое как прогар, не ведет к аварии, и наоборот небольшой по площади, но критический по глубине прогар не воспринимается как таковой. Современные системы диагностирования используют вторичные параметры состояния ИПУ, которые не являются эффективными при проведении диагностики.

Первичным параметром состояния ИПУ является тепловое поле ее поверхностей, позволяющее судить о состоянии внутренних элементов ИПУ. Использование только температурного поля как основного диагностического параметра в целом не решает проблему разработки эффективной системы диагностирования, так как ИПУ является сложной системой и ее диагностирование требует учета динамики изменения характеристик состояния основных

элементов системы, влияния отказавших элементов системы на характеристики других элементов, прогнозирования состояния.

Для решения вышеперечисленных задач и снижения вероятности возникновения аварии при плавке актуальной является разработка системы поддержки принятия решений по диагностированию состояния ИПУ на основе обработки информации о тепловом поле ее внешней поверхности с использованием средств искусственного интеллекта.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности системы поддержки принятия решений при диагностировании состояния ИПУ на основе обработки информации о термографическом изображении ее поверхности.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. Разработать математические модели распределения тепла в ИПУ для решения задачи идентификации неисправности ИПУ в процессе принятия решений по ее диагностированию с учетом реологических преобразований на основе законов теплопередачи.

2. Разработать метод и алгоритмы идентификации неисправности ИПУ для распознавания термограмм поверхности с использованием самоорганизующейся нейронной сети.

3. Разработать алгоритмы поддержки принятия решений о неисправности ИПУ на основе базы правил, сформированной по результатам анализа последствий и причин отказов.

4. Разработать программное обеспечение системы поддержки принятия решений о состоянии ИПУ в процессе ее функционирования.

5. Оценить эффективность системы поддержки принятия решений о состоянии ИПУ на основе экспериментальных данных.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены с использованием методов теории автоматического управления, теории управления рисками, теории графов, теории вероятности; для моделирования распределения тепла в ИПУ использовался пакет *COMSOL Multiphysics*; для построения алгоритма автоматического обнаружения и локализации неисправности использовались нейросетевые алгоритмы.

Программное обеспечение разрабатывалось в среде *Delphi7* с использованием библиотек *DevExpress* и технологии *ActiveX*.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработаны математические модели распределения тепла в ИПУ, основанные на моделях электромагнитного поля и процессов теплообмена, отличающиеся тем, что данные модели рассматриваются совместно с моделями реологических преобразований, что позволяет учитывать изменение теплофизических свойств ИПУ в целом.

2. Разработан метод и алгоритмы идентификации неисправности ИПУ на основе термограммы поверхности ИПУ, отличающиеся использованием нейросетевых алгоритмов для локализации места неисправности, что позволяет определять область неисправности или риска с меньшей погрешностью.

3. Разработано алгоритмическое обеспечение системы поддержки принятия решений, основанное на использовании предложенной базы правил, отличающееся использованием термограммы поверхности как основного диагностического параметра, что позволяет прогнозировать состояние ИПУ.

Практическую ценность имеют:

1. Разработанные модели распределения тепла позволяют получить зависимость глубины прогара от превышения температуры на поверхности ИПУ, что позволяет оценить чувствительность предложенного метода к определению глубины прогара футеровки (не менее $10^{\circ}\text{C}/\text{см}$).

2. Применение разработанного программно-аппаратного комплекса диагностирования ИПУ, использующего нейросетевой алгоритм локализации неисправности, позволяет автоматизировать поиск места неисправности, снизить погрешность локализации неисправности, увеличить время наработки на отказ до 30 %, снизить затраты на восстановление после аварии до 40%.

Апробация результатов работы.

Основные положения работы были доложены и обсуждены на: Всероссийских студенческих научно-технических конференциях «Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники» (2005–2007, г. Воронеж); Международной научной конференции «Наука и образование» (2006, г. Белово); Международной молодежной научной конференции «XIV Туполевские чтения» (2008, г. Казань); XI, XII и XIII Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электроника и энергетика» (2005–2007, г. Москва); IX Международной научно-практической конференции «Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах» (2008, г. Новочеркасск); на Международных научно-практических интернет-конференциях «Информационные технологии в науке и образовании» (2009, 2010, г. Шахты); IV Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» (2009, г. Астрахань); V Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы в науке и технике» (2010, г. Уфа); X Международной научно-методологической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии» (2010, г. Воронеж); IV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научный потенциал студенчества в XXI веке» (2010, г. Ставрополь); IV Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве ИТНОП-2010» (г. Орел); I Всероссийской научно-практической конференции «Интеллект. Инновации. Информация. Инвестиции. Институты. Инфраструктура» (2010, г. Москва); на конкурсе «У.М.Н.И.К. – Башкортостан 2010»; Зворыкинской смене форума Селигер-2010.

Результаты диссертационной работы внедрены в рамках выполнения работ по проекту «Программно-аппаратный комплекс диагностики состояния индукционной тигельной печи» по программе «У.М.Н.И.К.».

На защиту выносятся:

1. Математические модели распределения тепла в ИПУ для решения задачи идентификации неисправности ИПУ с учетом реологических преобразований, позволяющие получить зависимость глубины прогорания футеровки от превышения температуры на поверхности ИПУ и выявить зависимость теплового поля поверхности ИПУ от внутренней неисправности.

2. Метод и алгоритмы идентификации неисправности ИПУ по термограмме поверхности с использованием самоорганизующейся нейронной сети.

3. Алгоритмы поддержки принятия решения о неисправности ИПУ на основе предложенной базы правил.

4. Программное обеспечение системы поддержки принятия решений о состоянии ИПУ.

5. Результаты экспериментальной проверки разработанного программного обеспечения.

Публикации

Основные положения и результаты исследования по теме диссертации опубликованы и непосредственно отражены в 17 работах, из них 4 – в изданиях, входящих в список ВАК, в том числе получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 134 источников и приложений общим объемом 113 страниц. В работе содержится 64 рисунка и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, положения, выносимые на защиту, указана научная новизна и практическая ценность работы.

Первая глава посвящена обзору, систематизации и анализу применяемых в настоящее время средств и методов, позволяющих проводить мониторинг, идентификацию и диагностику состояния ИПУ, обоснованию необходимости использования систем поддержки принятия решений (СППР) по диагностированию состояния ИПУ и определению структуры разрабатываемой СППР.

Классифицированы методы и средства диагностирования состояния индукционной плавильной установки. По результатам проведения сопоставительного анализа существующих методов, средств диагностики ИПУ показано, что недостатки термоэлектрических методов (метод обнаружения неисправности по току утечки через заземляющий ванну стержень, метод точечного определения температуры с использованием термопар, с использованием проволочных сеток на основе измерения напряженности электрического поля между расплавленным металлом и сеткой, с использованием наборов металлических электродов на основе измерения сопротивления) и контакт-

ных средств измерения в отношении выдвигаемых требований приводят к недостоверной оценке состояния ИПУ. Проведена классификация методов измерения по принципу действия существующих средств и методов диагностики и ИПУ.

Рассмотрены существующие аналоги устройств диагностирования состояния ИПУ (роботизированные управляющие комплексы и диагностирующие системы), анализ которых показал их недостаточную эффективность и необходимость модернизации.

Установлено, что перспективными являются интеллектуальные оптические методы диагностики ИПУ с использованием распределенных средств измерения.

Обобщен материал по методам распознавания термограмм ИПУ и дана рекомендация по использованию нейросетевых алгоритмов для их кластеризации.

В соответствии с выявленными методами и средствами диагностирования определена цель и поставлены задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке научных основ влияния распределения тепла в ИПУ на ее неисправность.

Разработка упрощенной математической модели распределения тепла в ИПУ (передача тепла между кожухом и остальной частью ИПУ осуществляется только излучением; расплав представляет собой сплошной объем, хотя и содержит разнородные области с отличающимися друг от друга свойствами, т.е. иными словами тепло внутри садка (шихты) распространяется контактным способом теплопроводностью, конвективный и радиационный теплообмен исключаются; передача тепла в осевом направлении пренебрежимо мала; индуктор представлен сплошным однородным цилиндром (распределенная индукторная система заменена системой, имеющей один виток); реальная коническая система ИПУ заменена на цилиндрическую) позволила получить зависимость превышения температуры на внешней поверхности ИПУ от глубины прогара футеровки.

Анализ составляющих полученной зависимости показал, что наибольшее падение температуры происходит в слое футеровки, остальные слагаемые являются величинами второго и/или третьего порядка малости температура внешней поверхности устройства будет определяться перепадом температуры в слое футеровки

$$\Delta\tau_c = \frac{p_n}{2\pi} \sum_1^k \frac{1}{\lambda_k} \ln \frac{D_{k+1}}{D_k},$$

где $p_i = 6,2 \cdot 10^{-6} (I_e w_e)^2 d_p \sqrt{\rho(\theta)\mu(\theta)f}$ – удельная погонная мощность, выделяемая в расплаве; $I_n w_n$ – удельная линейная нагрузка индуктора (МДС на единицу длины индуктора); $\rho(\theta)$ – удельное сопротивление расплава; $\mu(\theta)$ – относительная магнитная проницаемость материала расплава; f – частота индуцируемого тока; d_p – внутренний диаметр футеровки; $\lambda(t)$ – коэффициент

теплопроводности; D_{k+1} , D_k – внешний и внутренний диаметры исследуемого слоя ИПУ.

После преобразования этого выражения относительно изменения толщины футеровки определена чувствительность температуры внешней поверхности ИПУ к этому изменению (не менее $10^\circ\text{C}/\text{см}$). Предложенная упрощенная модель подтверждает эффективность выбранного способа диагностирования.

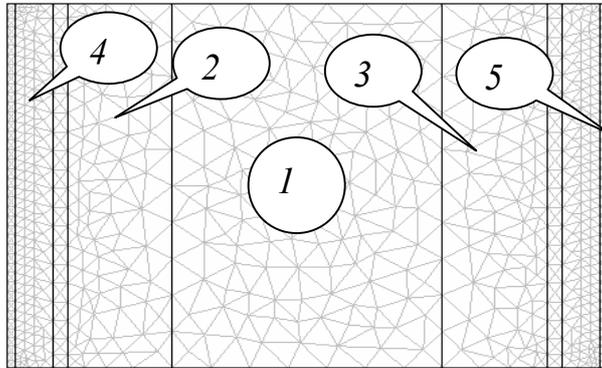


Рис. 1 – Осевое сечение ИПУ: 1 – ванна с расплавом; 2 – футеровочный слой; 3 – индукторная система; 4 – воздушный зазор; 5 – корпус

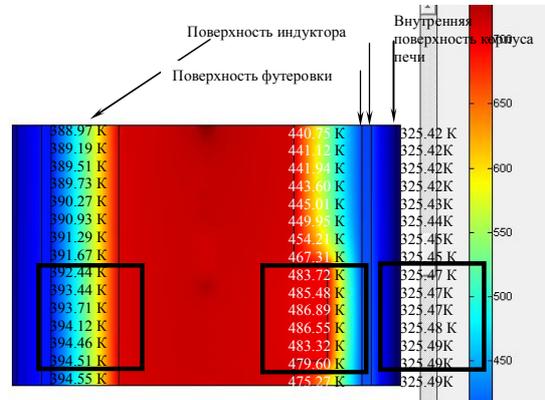


Рис. 2 – Температурный профиль поперечного сечения ИПУ при дефекте слоя футеровки

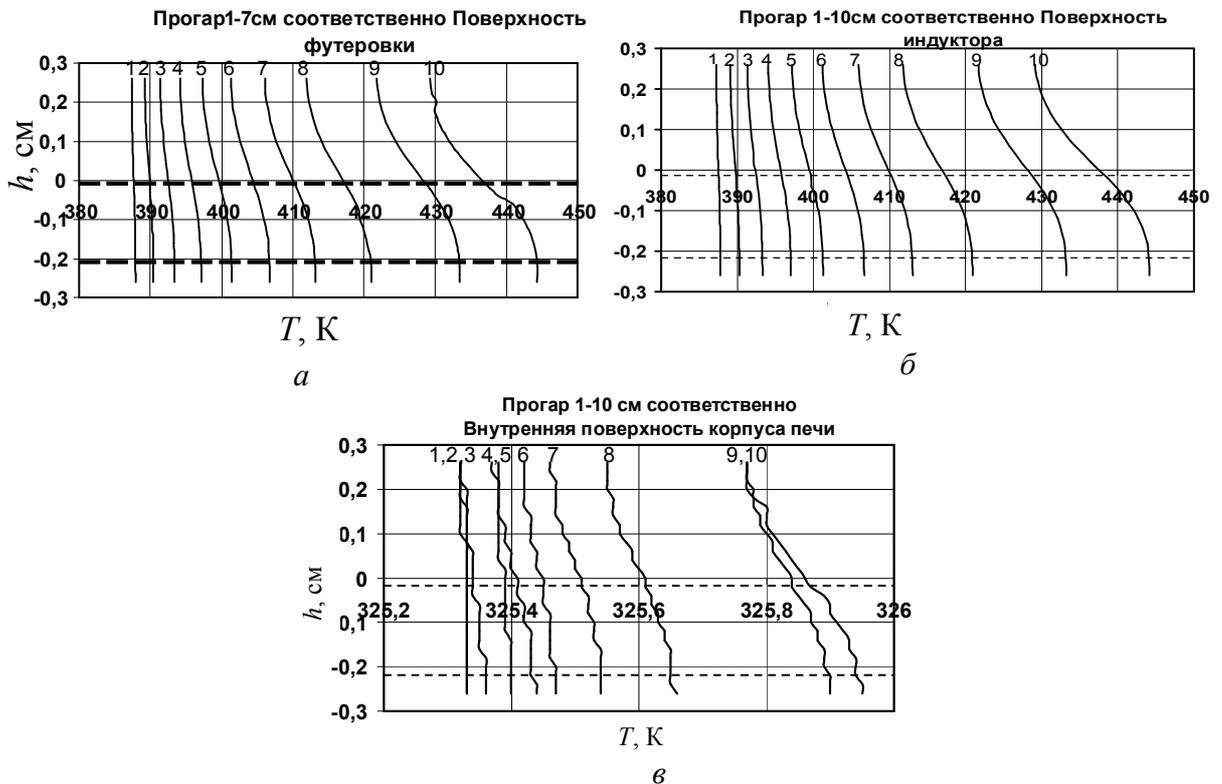


Рис. 3 – Тепловые профили конструктивно доступных для наблюдения слоев ИПУ: а – тепловой профиль поверхности футеровки; б – тепловой профиль поверхности индуктора; в – тепловой профиль внутренней поверхности корпуса

Уточненная математическая модель нагрева ИПУ первичными и вторичными токами описана совместным действием уравнений Максвелла,

уравнения теплопроводности и реологических преобразований, которая дополнена граничными условиями:

- для внутренней границы модели заданы граничные условия второго рода (граничные условия Неймана);

- для моделирования контакта ИПУ (внешней границы модели) с окружающим воздухом использованы граничные условия третьего рода (Ньютона-Рихмана);

- для отдельных слоев, непосредственно взаимодействующих друг с другом – расплав и футеровка, футеровка и индукторная система, индукторная система – воздушный слой, воздушный слой и корпус ИПУ заданы граничные условия четвертого рода.

Полученная компьютерная модель ИПУ позволила подтвердить чувствительность внешнего температурного портрета, получить тепловые профили (рис. 2, 3) различных поверхностей ИПУ и определить характер этих профилей, имеющих область нечувствительности от 1 до 4см.

Рассматриваемая модель с учетом реологических изменений физических параметров аналитического решения не имеет, поэтому для ее разрешения применен численный метод – метод конечных элементов (рис. 1).

Погрешность локализации места неисправности не более 12–15 %, что связано с размытостью теплового пятна.

В работе представлена методика создания компьютерных тепловых моделей ИПУ, позволяющая исследовать тепловые поля как нормально работающего, так и с присутствием внутреннего дефекта (источника повышенной температуры) футеровочного слоя ИПУ.

Третья глава посвящена разработке метода локализации места неисправности и прогнозирования состояния ИПУ по термограмме поверхности, формированию механизма логического вывода подсказки оператору, построению концептуальной модели предметной области системы принятия решений по диагностике ИПУ, формированию базы правил и определению требований к системе принятия решений по диагностике ИПУ.

Преобразование термограммы поверхности заключается в формировании структуры самоорганизующейся карты максимально отражающей структуру термограммы в соответствии со следующими выражениями, где x – входной вектор, m_i – вектор модели, $d(x, m_i) = \|x - m_i\|$ – евклидово расстояние – мера сходства между структурой сети и входной термограммой, h_{ci} – функция соседства, $\alpha(t)$ – скорость обучения, c – индекс нейрона-победителя, i – индекс нейрона, $\sigma(t)$ – ширина ядра нейронной сети, r_i и r_c векторы, определяющие размещение узлов c и i , e – ошибка обучения

$$\begin{cases} c = \arg \min_i \{ \|x - m_i\| \}, \\ m_i(t+1) = m_i(t) + h_{ci}(t)[x(t) - m_i(t)], \\ h_{ci}(t) = \alpha(t) c^{-\|r_c - r_i\|^2 / [2\sigma^2(t)]}, \\ e = \sum_{i \in L} h_{ci} d(x, m_i). \end{cases}$$

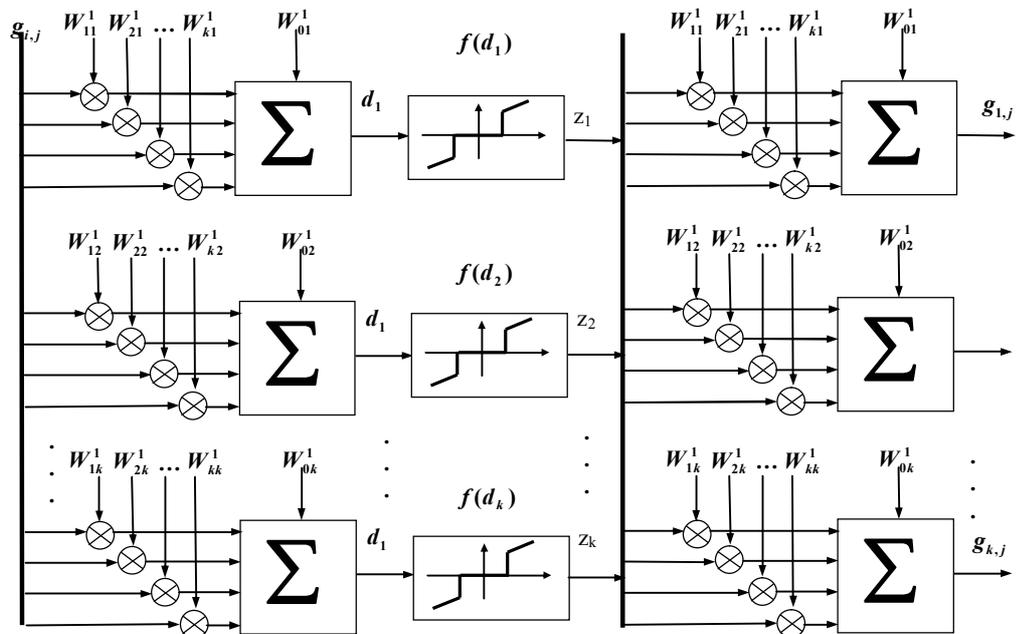


Рис. 4 – Структура самоорганизующейся карты для локализации неисправности ИПУ

Разработанная нейронная сеть имеет гексагональную топологию, два слоя с 255 нейронами, структура сети представлена на рис. 4, где $W^{(1)}$ – матрица весовых коэффициентов нейронов самоорганизующейся карты, $W_0^{(1)} = M_y$ – вектор смещения определяет задержку поступления данных на вход карты, функция обоих слоев активации линейная. В карте имеются полные последовательные связи от входа к первому слою, полные последовательные и перекрестные связи от первого слоя ко второму.

Обучение сети происходит по эволюционному алгоритму. Для получения глобально упорядоченной карты выбран начальный радиус окрестности обучения $N_c(0) = 0,8N$, который в процессе обучения линейно уменьшается до 1, скорость обучения задается при помощи коэффициента скорости обучения $\alpha(t) = \frac{1}{t+1}$, который позволяет уменьшить время обучения. На вход карты поступает термограмма поверхности ИПУ (рис. 5).

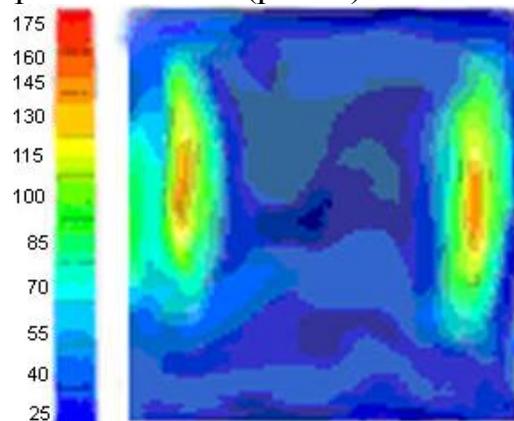


Рис. 5 – Термограмма поверхности ИПУ

Для прогнозирования состояния ИПУ используется нейронная сеть с алгоритмом оценки, на вход поступает $X_{t-1} = \{x(t-n), x(t-n+1), \dots, x(t-1)\}$ – ко-

нечная последовательность случайных векторных входных отсчетов сигнала, доступных к моменту времени $t-1$.

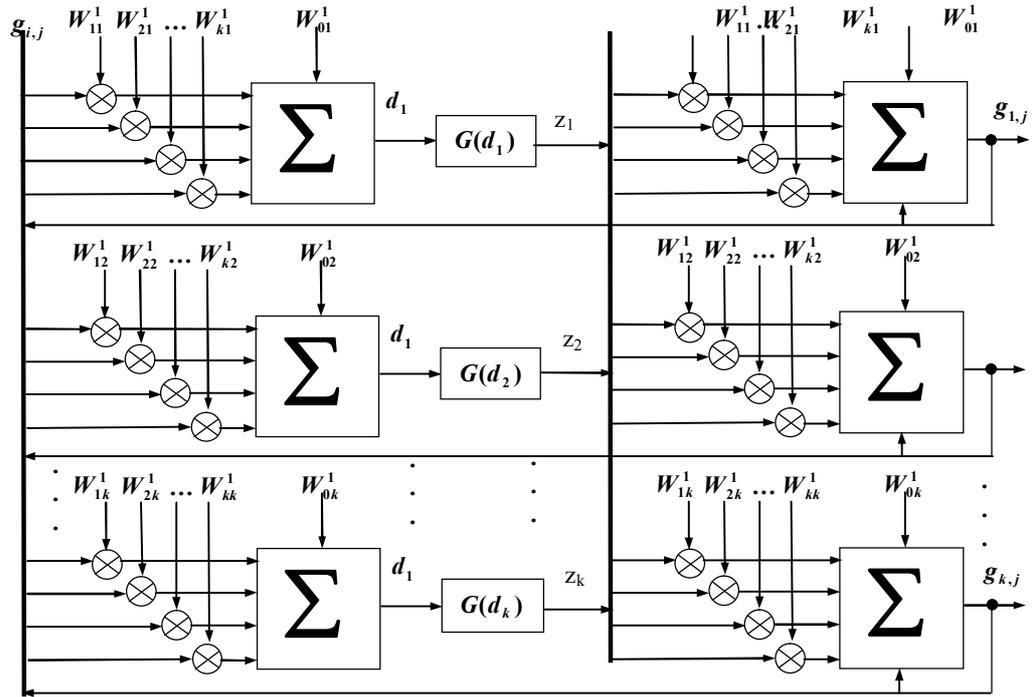


Рис. 6 – Структура карты Кохонена для прогнозирования состояния ИПУ

Прогноз в i -й клетке сети определится как $\hat{x}_i = G_i(X_{t-1}) = \sum_{k=1}^n b_{ik}(t)x(t-k)$,

что соответствует прогнозному изменению температуры на поверхности ИПУ с вероятностью 0,84 для одного шага прогноза, соответствующего одной плавке продолжительностью 45 мин. Карта характеризуется наличием обратных связей на вход карты. Структура сети для прогнозирования состояния ИПУ представлена на рис. 6. Она обучается на основе пяти термограмм поверхностей ИПУ, полученных по разработанной тепловой модели ИПУ.

Выходной сигнал самоорганизующейся карты для распознавания термограммы поверхности ИПУ имеет вид матрицы, содержащей координаты точек входной термограммы и соответствующий им номер кластера. Эта матрица не содержит в явном виде решения о состоянии ИПУ, поэтому для получения выходной логической переменной, имеющей термы: «продолжение эксплуатации ИПУ в прежнем режиме», «проведение ремонта по завершению плавки», «прекращение плавки и слив металла» использован механизм логического вывода.

Входными для механизма логического вывода являются переменные: «число плавков» (меньше 80, между 80 и 100, более 100), «глубина прогара футеровки» (незначительная – от 1 до 5 см, некритическая – от 6 до 11 см, критическая – более 11 см), «площадь теплового пятна» (точечная, средняя, большая). Функции принадлежности для всех этих переменных аналогичны друг другу, они приведены в таблице 1.

В соответствии с разработанной концептуальной моделью предметной области системы принятия решений по диагностированию состояния ИПУ,

включающей объектную, функциональную и поведенческие модели была сформирована база правил.

Таблица 1

Входные параметры

Название переменной	Диапазон значений	Терм	Функция принадлежности
Число плавков	1-80	Меньше 80	$\mu_1(u) = \begin{cases} 1, u \in [0, u_{z1}] \\ 1 - k_1 \frac{u - u_{z1}}{u_{z2}}, u \in [u_{z1}, u_{z2}] \end{cases}$
	80-100	Между 80 и 100	$\mu_2(u) = \begin{cases} k_2(u - u_{z1}), u \in [u_{z1}, u_{z2}] \\ 1 - k_2(u - u_{z2}), u \in [u_{z2}, 1] \end{cases}$
	Более 100	Более 100	$\mu_3(u) = \begin{cases} k_3(u - u_{z2}), u \in [u_{z2}, 1] \\ 1, u \geq 1 \end{cases}$
Глубина прогара футеровки (см)	1-5	Малый прогар	$\mu_1(u) = \begin{cases} 1, u \in [0, u_{z1}] \\ 1 - k_1 \frac{u - u_{z1}}{u_{z2}}, u \in [u_{z1}, u_{z2}] \end{cases}$
	6 -11	Некритиче-ский прогар	$\mu_2(u) = \begin{cases} k_2(u - u_{z1}), u \in [u_{z1}, u_{z2}] \\ 1 - k_2(u - u_{z2}), u \in [u_{z2}, 1] \end{cases}$
	Более 11	Критиче-ский прогар	$\mu_3(u) = \begin{cases} k_3(u - u_{z2}), u \in [u_{z2}, 1] \\ 1, u \geq 1 \end{cases}$

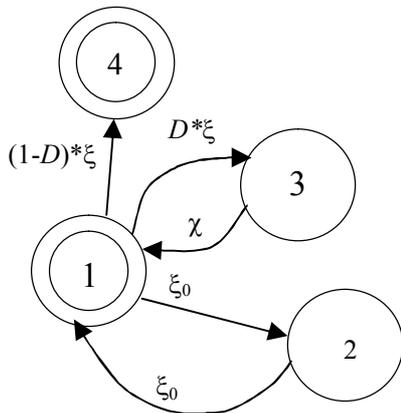


Рис. 7 – Граф состояний, отражающий процесс потери функциональности плавильным модулем

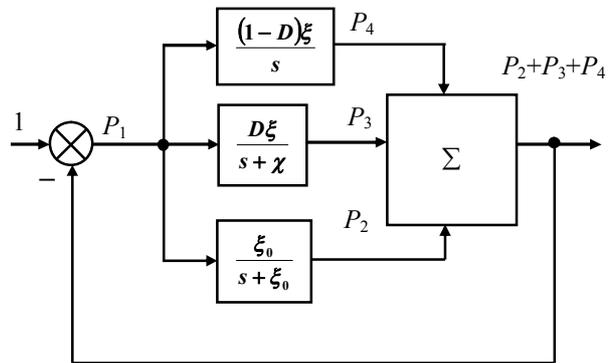


Рис. 8 – Эквивалентная структурная схема процесса функционирования ИПУ

Поведенческая модель предметной области, построенная на основе модели Маркова, позволяет представить процесс функционирования ИПУ в виде графа (рис. 7, 8), где возможные состояния ИПУ: 1 – первоначальное и последующие работоспособные состояния модуля, в которых вероятность безотказной работы модуля составляет величину $P(mT)$, где m – номер плавки, T – продолжительность одной плавки; 2 – дежурное состояние плавильного

модуля, 3 – состояние, в которое переходит модуль при обнаружении отказа диагностической системой с вероятностью D (контролируемый отказ); 4 – тупиковое состояние (неконтролируемый системой диагностирования отказ с вероятностью наступления $1-D$), ξ – интенсивность (частота) отказов модуля

$$\left(\xi = \frac{\text{кол-во_событий}}{\text{период_времени}} = \frac{1}{80} \div \frac{1}{100} = 0,0125 \div 0,01 \text{ ч}^{-1}\right), \chi - \text{частота восстановления футеровки модуля}$$

$$\left(\chi = \frac{\text{кол-во_событий}}{\text{период_времени}} = \frac{1}{14} = 0,0714 \text{ ч}^{-1}\right).$$

В соответствии с поведенческой моделью определены требования к реализации программного обеспечения (частота опроса измерительной аппаратуры, время и периодичность диагностирования), эффективность и достоверность диагностирования.

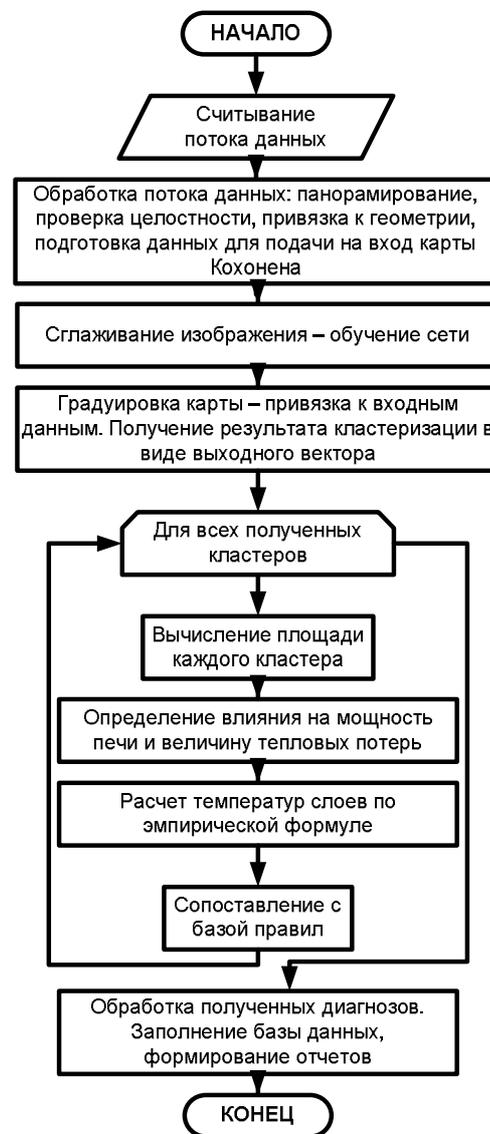
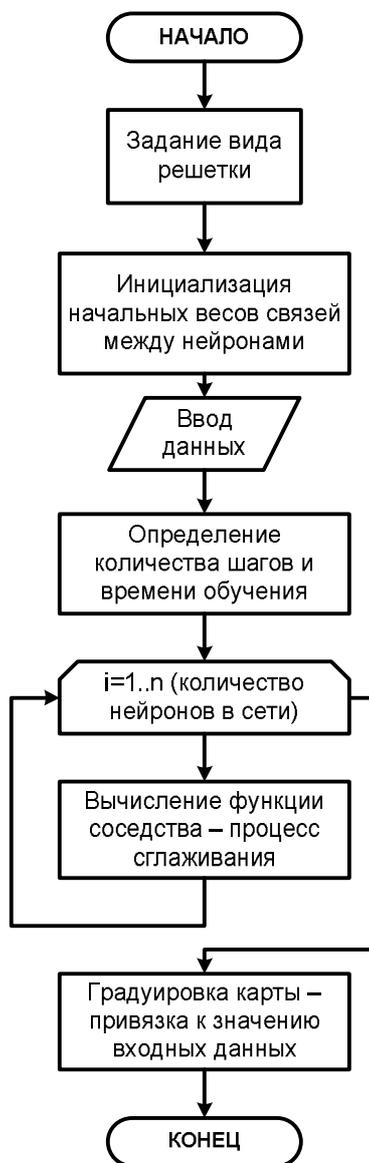


Рис. 9 – Алгоритм функционирования самоорганизующейся сети

Рис. 10 – Алгоритм функционирования экспертной системы диагностики состояния СНЭ по тепловому портрету

Разработаны алгоритмы считывания данных с измерительной аппаратуры, алгоритм обработки полученных данных, алгоритм работы самоор-

ганизирующей сети (рис. 9) и функционирования экспертной системы диагностики ИПУ по термограмме ее поверхности (рис. 10).

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию системы принятия решений по диагностированию состояния ИПУ, проверке адекватности и достоверности моделей распределения тепла и оценке экономического эффекта внедрения системы поддержки принятия решений.

Для характеристики предложенной методики распознавания тепловых изображений использовано температурное поле ИПУ (рис. 11).

Для определения точности диагноза и точности прогноза, осуществляемого сетью, использован математический аппарат самоорганизующихся сетей и корреляционная функция. Зависимость ошибки обучения карты Кохонена, которая соответствует ошибке диагностирования экспертной системы, представлена на рис. 12.

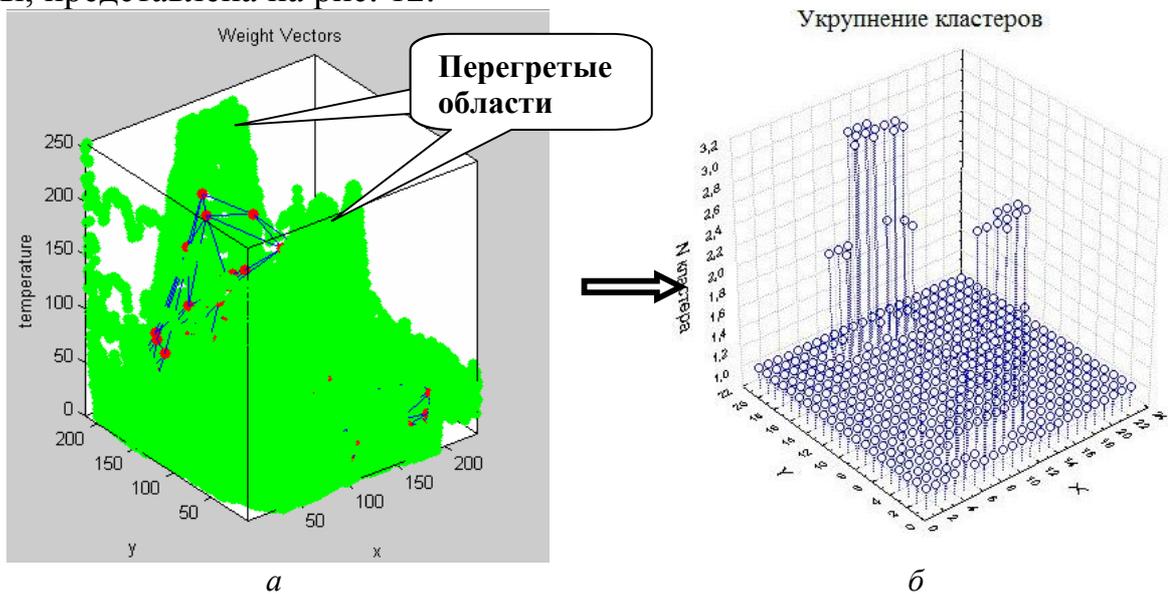


Рис. 11 – Обнаружение перегретых областей картой Кохонена
а – первичная кластеризация, *б* – объединение кластеров по правилу ближайшего соседа

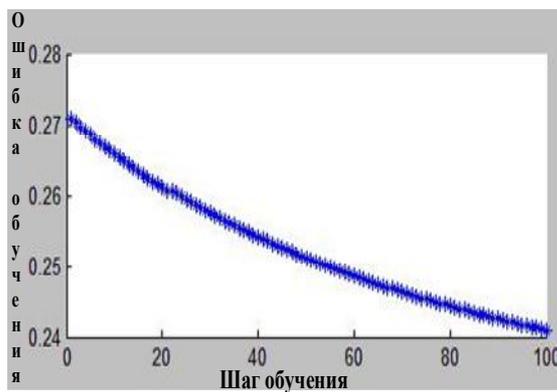


Рис. 12 – Ошибка обучения карты Кохонена

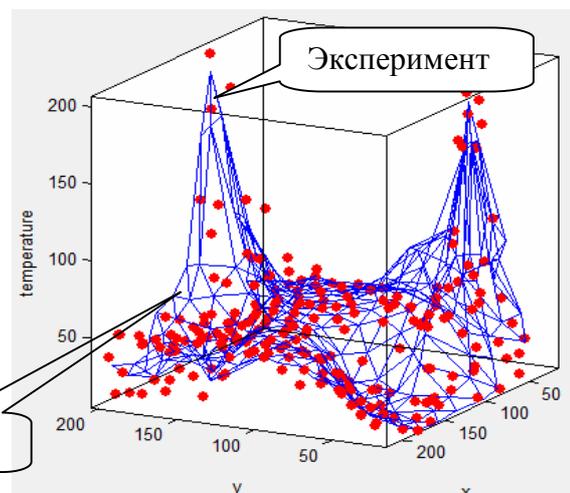


Рис. 13 – Сравнение реального и прогнозного распределения температуры через один цикл плавки

Полученная ошибка прогнозирования позволяет доверять прогнозу на пять шагов вперед, прогнозируемые и реальные температурные профили изображены на рис. 13.

Выходной список экспертной системы является результатом диагностирования состояния ИПУ, каждый кластер будет соответствовать участку теплового пятна на поверхности ИПУ. Значение характеристического параметра и площадь кластера определяет диагноз, соответствующий каждому кластеру в соответствии с базой правил (рис. 14).

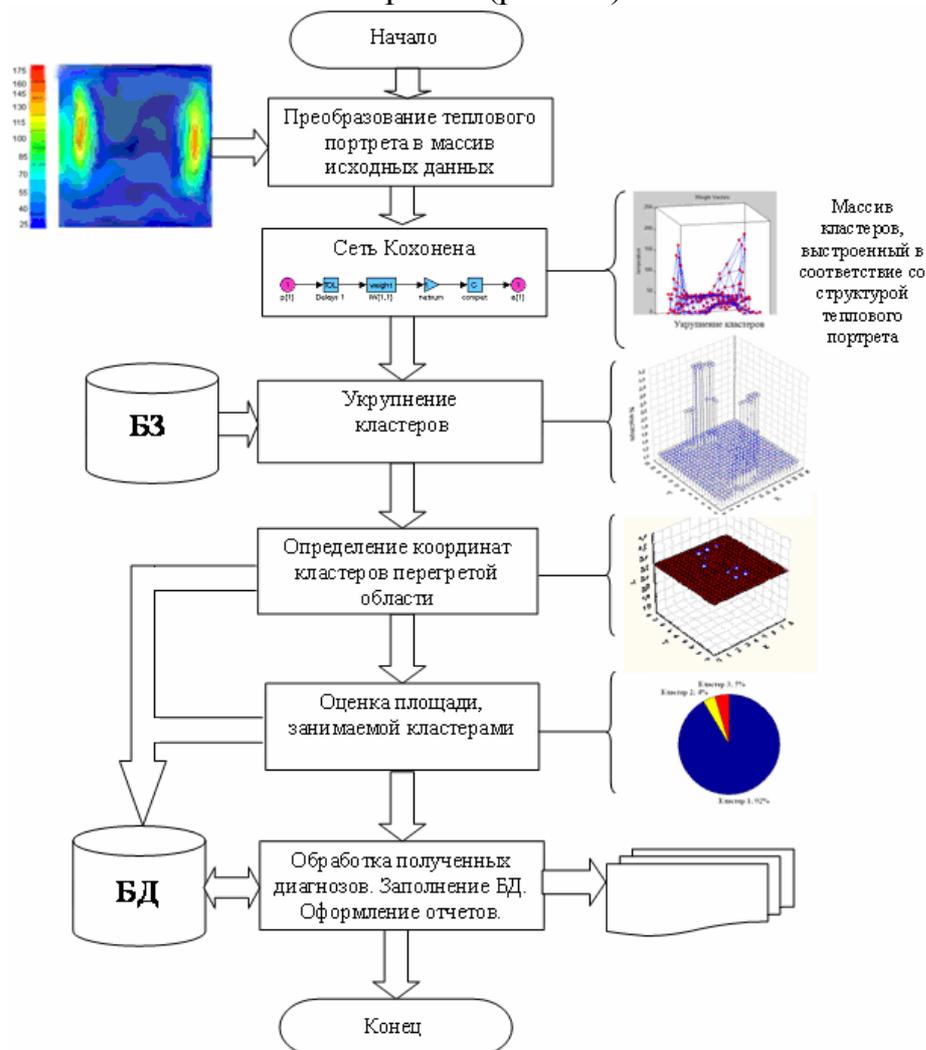


Рис. 14 – Программно-аппаратный комплекс системы принятия решений по диагностированию состояния ИПУ

В главе осуществлена оценка перспектив использования предложенной методики мониторинга, диагностики и идентификации состояния внутренних слоев ИПУ и рассмотрены основные статьи технико-экономического эффекта от ее внедрения:

– Обеспечение оптимального КПД на различных этапах плавки, снижение энергопотребления плавильной печи до 10%. Зависимость КПД ИПУ от толщины футеровки характеризуется увеличением КПД при снижении толщины футеровки. Возможность поддержания толщины футеровки на уровне обеспечения оптимального КПД ведет к снижению энергопотребления, так энергопотребление при толщине футеровки 15 см

составляет 656 кВт/т, снижение толщины футеровки до 12,5 см соответствует снижению энергопотребления на 58 кВт/т в неделю. Разработанная система принятия решений предполагает поддержание толщины футеровки на уровне не меньше 11 см;

– Увеличение наработки на отказ за счет предупреждения аварийных ситуаций до 30%. Наработка на отказ $T_0 = \frac{1}{\Omega_0}$, где Ω_0 – параметр потока

отказа восстанавливаемых объектов. При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы этот параметр совпадает с интенсивностью отказов $\Omega_0 = \xi$, тогда отношение интенсивностей отказов до и после введения системы поддержки принятия решения составит

$$\frac{\Omega_{01}}{\Omega_{02}} = \frac{0,0033}{0,0125} = 0,264.$$

– Повышение вероятности безотказной работы практически в два раза. Приращение вероятности безотказной работы определяется по формуле $\Delta P(t) = P_a(t) - P(t)$, где $P_a(t)$ - вероятность безотказной работы ИПУ при его диагностировании, которая определяется по поведенческой модели ИПУ, $P(t)$ - вероятность безотказной работы ИПУ при отсутствии системы диагностирования.

Предложенный метод локализации места неисправности по термограмме также может применяться при технологической обработке деталей сложного профиля, для контроля состояния атомных реакторов, для контроля теплоизоляции, при исследовании биологических процессов в медицине, для контроля состояния продуктопроводов, для контроля уровня и положения теплых и холодных жидкостей в резервуарах, для контроля состояния изоляции высоковольтных выводов электрооборудования и многих других целей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в диссертационной работе, получены следующие основные научные и практические результаты и выводы:

1. Получены математические модели распределения тепла в индукционной плавильной установке помимо нагрева первичными и вторичными токами и теплопередачи, учитывающие реологическое состояние расплава, позволяющие определить чувствительность температуры внешней поверхности к глубине прогара футеровки не менее 10°C/см, тепловые профили поверхности имеют зону нечувствительности от 1 до 4 см.

2. Разработан метод и алгоритмы идентификации неисправности ИПУ по термограмме поверхности с использованием самоорганизующейся нейронной сети, что позволяет снизить погрешность локализации отказа (не превышает 12–15 %).

3. Разработаны алгоритмы поддержки принятия решений по диагностированию состояния ИПУ на основе базы правил, сформированной по ре-

зультатам анализа последствий и причин отказов в процессе функционирования ИПУ.

4. Разработано программное обеспечение системы поддержки принятия решений по диагностированию состояния ИПУ.

5. По результатам оценки эффективности на основе экспериментальных данных ошибка определения неисправности не превышает 20 %, прогноз является достоверным на пять плавок вперед с доверительной вероятностью 0,66.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ

В изданиях из перечня ВАК

1. Идентификация состояния сложнзависимых нагревательных объектов / М. Б. Гузаиров, А. П. Костюкова // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2010. Т. 14, № 4 (39). С. 87–93.

2. Исследование надежности сложносвязных плавильных объектов / А. П. Костюкова // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 4 (42). С. 78–83.

3. Системы диагностирования рисков эксплуатации сложносвязных нагревательных объектов / М. Б. Гузаиров, А. П. Костюкова // Естественные и технические науки. 2010. № 6. С. 456–461.

4. Система управления эксплуатационными рисками сложносвязных нагревательных объектов / М. Б. Гузаиров, А. П. Костюкова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление: СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. № 6 (113). С. 40–44.

В других изданиях

5. Формирование базы эталонов для классификации состояний элементов электротехнических систем / А. П. Костюкова // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века: тр. рег. студ. науч.-техн. конф. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2006. С. 262–267.

6. Тепловизионная система диагностики как инструмент технического обслуживания / А. П. Костюкова // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники: Труды региональной студенческой науч.-техн. конф. Воронеж: Воронежск. гос. техн. ун-т, 2007. С. 41–44.

7. Компьютерная система неразрушающего контроля сложнагруженных агрегатов / М. Б. Гузаиров, А. П. Костюкова // Информационные технологии моделирования и управления. Воронеж: Научная книга, 2009. № 2 (54). С. 284–289.

8. Панорамирование как способ обработки термографических изображений / М. Б. Гузаиров, А. П. Костюкова // Информационные технологии в науке и образовании: Международ. науч.-практ. Интернет-конференция. Шахты: ГОУВПО «ЮРГУС», 2009. С. 106-108.

9. Построение информационных моделей измерений в задачах идентификации и диагностики электрических плавильных элементов / М. Б. Гузаиров, А. П. Костюкова // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: IV Всерос. научн. конф.. Астрахань, 2009. С. 589–590.

10. Интеллектуализация системы диагностирования и идентификации многосвязных нагревательных объектов / А. П. Костюкова // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы X Междунар. науч.-метод. конф. Воронеж: Воронежск. гос. ун-т, 2010. С. 359–363.

11. Интеллектуальные системы диагностики и идентификации состояния индукционных тигельных печей / А. П. Костюкова // Актуальные проблемы в науке и технике. Т. 2. Информационные технологии: сб. тр. 5-й Всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 199–202.

12. Мониторинг и диагностика как элементы систем управления техногенными рисками при эксплуатации многосвязных плавильных элементов / М. Б. Гузаиров, А. П. Костюкова // Информационные технологии в науке, образовании и производстве ИТНОП-2010: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. Орел: ОрелГТУ, 2010. Т. 3. С. 152–159.

13. Термографическое диагностирование как инновационный метод увеличения надежности тигельных плавильных печей / М. Б. Гузаиров, А. П. Костюкова // Интеллект. Инновации. Информация. Инвестиции. Институты. Инфраструктура: материалы I Всерос. научн.-практ. конф. М.: МАКС-Пресс, 2010. С. 25–28.

14. Анализ и исследование функционирования систем управления многосвязных плавильных элементов с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик / А. П. Костюкова // Мавлютовские чтения: Всерос. молодежн. научн. конф. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 205–207.

15. Управление рисками сложносвязных нагревательных объектов / М. Б. Гузаиров, А. П. Костюкова // Компьютерные науки и информационные технологии: 12-я Междунар. конф. Уфа: УГАТУ, 2010. Т. 1. С. 177–181. (Статья на англ. яз.).

16. Построение системы управления эксплуатационными рисками сложносвязных нагревательных объектов / А. П. Костюкова // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: Всерос. конф. с элементами научн. шк. для молодежи. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 81–83.

17. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2010612139. TIGEL: сбор, обработка, хранение термографических изображений многосвязных нагревательных объектов / М. Б. Гузаиров, А. П. Костюкова // Зарег. 23.03.2010. М.: Роспатент, 2010.

Диссертант



А.П. Костюкова

КОСТЮКОВА Анастасия Петровна

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПО ДИАГНОСТИРОВАНИЮ СОСТОЯНИЯ
ИНДУКЦИОННЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Специальность:

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 18.05.11. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отт. 1,0. Уч.-изд. Л. 0,8.

Тираж 100 экз. Заказ № 164.

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет

Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12