

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-4>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/09TVN416.pdf>

Статья опубликована 01.07.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Костюкова А.П. Автоматизированная система наблюдения, распознавания и регистрации состояния индукционных плавильных модулей // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/09TVN416.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 004.94:681.518.2:621.31

Костюкова Анастасия Петровна

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, Уфа¹

Доцент кафедры «Технической кибернетики»

Кандидат технических наук

E-mail: ktp@ufanet.ru

Автоматизированная система наблюдения, распознавания и регистрации состояния индукционных плавильных модулей

Аннотация. В статье рассмотрен являющийся актуальным вопрос повышения вероятности безотказной работы индукционной плавки металлов и сплавов. Однако в зарубежной и российской литературе в настоящее время недостаточное внимание уделяется потенциальным рисковому событиям возможным при эксплуатации индукционных плавильных модулей.

В данной статье разработана концепция построения алгоритмов нечеткого управления, основанная на применении самоорганизующихся карт Кохонена, технологическим процессом по анализу внешнего температурного портрета модуля, включая вычленение, распознавание, регистрацию, классификацию, кластеризации и диагностику тепловых пятен, имеющих температуры выше рабочих значений. На основе построения диаграммы Исикавы выявлены основные причины, влияющие на работоспособность технологического оборудования плавки металлов, выявлен основной параметр, определяющий потенциальные рисковые события, сопровождающие техпроцесс, и характеризующие безаварийность работы плавильных модулей. Для определения поведения индукционных плавильных модулей использована модель Маркова.

В результате определены совокупности контролируемых параметров техпроцесса, вероятности возможных рабочих и нештатных ситуаций, подтвердивших достоверность проведенных автором исследований, Дана модель расчета средней ожидаемой ошибки предсказания. Представлен алгоритм, обеспечивающий сбор, обработку и хранение термографических изображений, лежащий в основе автоматизированного рабочего места оператора плавильного модуля.

Ключевые слова: индуктивные плавильные модули; термограмма; неисправность; вычленение; распознавание; регистрация; рисковые события; самоорганизующиеся карты; нейронная сеть; вероятность

¹ 450076, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Левченко, 6, кв. 68

Быстрый рост рынка металлопродукции в условиях жестких требований импортозамещения приводит к необходимости улучшения качества продукции, надежности технологического процесса производства и оборудования, обеспечивающего его [1]. Для плавки цветных металлов, стали и чугуна как за рубежом, так и в России широко применяется индукционный процесс, который наряду с экологичностью, высокой производительностью позволяет обеспечивать высокую надежность и меньшие затраты на обслуживание техпроцесса и более низкие капитальные затраты [2]. Известные методы обеспечения высокого уровня отказоустойчивости не позволяют обеспечивать в полной мере: учет в динамических режимах изменения характеристик основных элементов *индукционных плавильных модулей (ИПМ)* и влияния отказавших и потенциально могущих отказать элементов системы на характеристики других элементов, предвидение следующих отказов и т.п. [3]. Поэтому для повышения отказоустойчивости ИПМ необходимо проведения исследования методов и моделей достижения необходимого уровня обеспечения надежности и *системы принятия проектных решений (СППР)* на основе обработки информации с использованием средств искусственного интеллекта [4].

Перечисленные преимущества достигаются за счет внедрения в процесс плавки непрерывного автоматического контроля и регистрации всех сопутствующих параметров. Потенциальные рисковые события, сопровождающие техпроцесс, и определяющие безаварийность работы ИТМ отображены на причинно-следственной диаграмме Исикавы (рис. 1) [5].

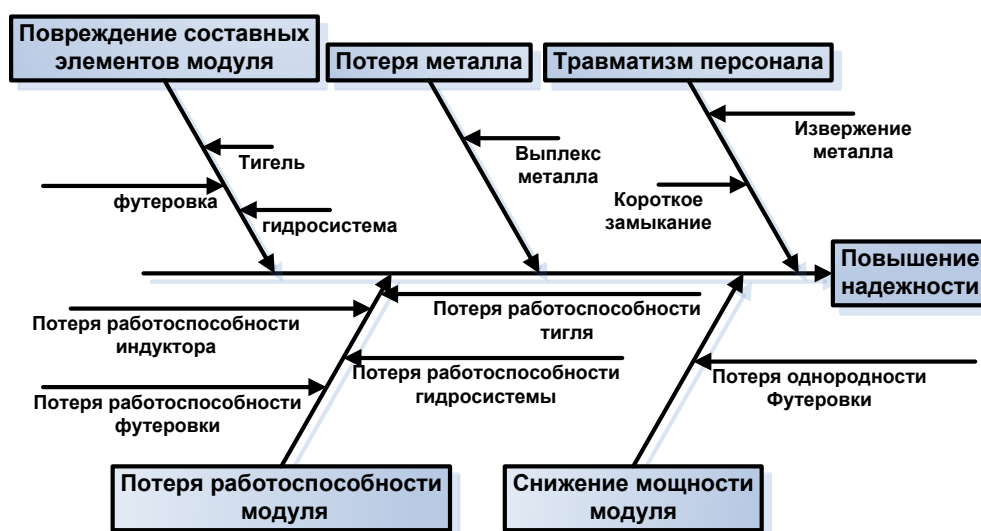


Рисунок 1. Влияние потенциальных рисковых событий на надежность индукционных плавильных модулей

Исследование рисковых ситуаций [6] показало (табл. 1), что основным наблюдаемым параметром как для штатных (рабочих), так и для нештатных режимов является распределение температурного поля (его компьютеризированного изображения - термограммы) по всем подсистемам ИПМ.

Для локализации места неисправности и прогнозирования состояния ИПМ произведено выделение диагностической информации из термограммы, которая включает в себя выделение областей (их площадей) близких точек изображения с одинаковыми температурами, фиксацию температур, определение координат этих областей. Анализ таких областей произведен с помощью самоорганизующихся карт Кохонена [7]. Основными достоинствами карт Кохонена является отсутствие необходимости в большом массиве

информации для обучения, регистрация и возможность хранения логической структуры термограммы и прогнозирование возможного состояния ИПМ.

Таблица 1

Идентификация наблюдаемых параметров плавильного процесса

Наименование штатных подрежимов плавки	Состояние металла	Значение наблюдаемых параметров
Пусковой режим	Визуально твердый металл	Температура окружающей среды (25°C)
Преднагревательный режим	Состояние металла твердо-вязкое, пузырьки, окалина, изменение цвета	Температура от 25°C до температуры плавления
Режим непосредственного плавления	Визуально расплавленный металл с комками	Температура плавления ±допуск
Режим расплава	Нет комков, металл полностью расплавлен	Температура плавления ±допуск
Режим кипячения	Кипящий металл	Температура кипения металла

Термограмма поверхности представляет собой зависимый от времени сигнал, характеризующийся размытостью границ между участками изображения. Она преобразуется в последовательность координат точек, которым присваивается номер кластера, соответствующий предварительному определению состояния ИПМ, значению температуры и градиенту ее роста в точке наблюдения.

Нейронная сеть выполняет преобразование входного сигнала в выходной путем решения задач классификации и кластеризации точек по значению температур и по их близости друг к другу. Преобразовательный процесс формирует структуру сети, в максимальной степени отражающей термограмму модуля:

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

где: x, m_i – векторы соответственно входного сигнала и модели, $d(x, m_i) = \|x - m_i\|$ – мера сходства между параметрами структуры сети и входной термограммы (евклидово расстояние), h_{ci} – функция соседства (сходства), $\alpha(t)$ – скорость обучения сети, c, i – индекс нейрона-победителя и текущего нейрона, $\sigma(t)$ – ширина ядра сети, r_i, r_c – векторы, характеризующие расположение узлов (индексов) c и i , а e является ошибкой обучения сети.

Данная сеть имеет топологию с двумя слоями нейронов. Матрица весовых коэффициентов связей - $W^{(1)}$ характеризует нейроны первого слоя, определяемая величиной задержки M^y поступления данных на вход карты. Функция активации первого слоя линейна. Нейроны второго слоя определяются вектором смещения $W_0^{(1)} = Z_i$. В карте Кохонена наблюдаются связи последовательно от входа к первому слою, а также связи последовательные и перекрестные от первого слоя ко второму.

При обучении такой сети принят эволюционный алгоритм. В течение одного «обучающего» шага входной процесс X , ранее обрабатываемый оператором G_c , определяющимся весовыми коэффициентами связей между нейронами, также обрабатывается одним или несколькими пробными операторами G_i , и в результате находится оператор G_b , являющимся наилучшим по отношению к G_c . Тогда оператор G_c меняется на G_b с вероятностью P , где P зависит от коэффициента скорости обучения $\alpha(t)h_{cc}$. Скорость обучения представляет собой важный параметр и в условиях эксплуатации модуля необходима минимизация этого времени. Прогнозирование состояния ИПМ заключается в распознании входной информации как некоторой конечной последовательности сигналов зависящих от времени

$$X_t = \{x(t-n+1), x(t-n+2), \dots, x(t)\}$$

При определении прогнозного состояния использован алгоритм, состоящий в нахождении нейрона, выполняющего оценивание сигнала $x(t)$ наилучшим образом. В соответствии i -й клетке сети поставлены параметрический оператор G_i , последовательность случайных входных отсчетов сигнала $X_{t-1} = \{x(t-n), x(t-n+1), \dots, x(t-1)\}$, доступных к моменту времени $t-1$. Таким образом, прогнозное значение в i -й клетке сети определится как $\hat{x}_i = G_i(X_{t-1})$.

Выражение $\|x(t) - \hat{x}_c(t)\| = \min_i \{\|x(t) - \hat{x}_i(t)\|\}$ определит элемент наилучшего соответствия с индексом. Средняя ожидаемая ошибка предсказания определится как $E = \int \sum_i h_{ci} \|x - \hat{x}_c\|^2 p(X) dX$, где $p(X)$ - плотность распределения вероятностей применительно ко всей входной информации, а dX - элемент объема в пространстве, в котором определяется последовательность X .

При анализе модели распределения тепла в ИПМ организован числовой ряд, представляющий изменение последовательности температуры на поверхности ИПМ во времени с учетом, что длительность одной плавки в среднем составляет 45 мин. В результате для прогнозной термограммы ИПМ выбрана следующая формула оценки

$$\hat{x}_i = \sum_{k=1}^n b_{ik}(t)x(t-k)$$

где b_{ik} - коэффициенты кодирования с линейным предсказанием.

На рис. 2 представлена структура самоорганизующейся карты, характеризуемая наличием обратных связей от второго слоя к входу.

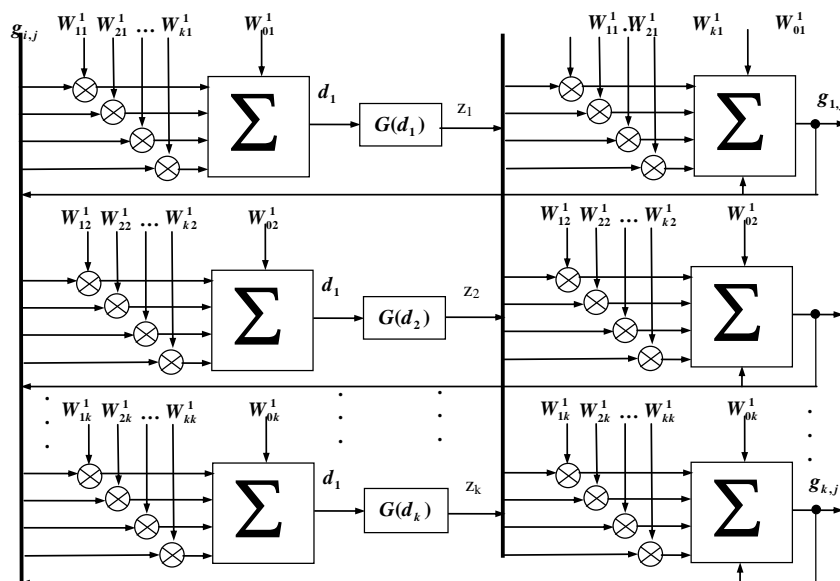


Рисунок 2. Структура карты Кохонена в режиме распознавания состояния ИПМ

Предложенный метод локализации неисправности ИПМ по термограмме поверхности основан на использовании самоорганизующейся нейронной сети, которая получает информацию в виде последовательности значений температуры. Обучение сети проведено в соответствии с эволюционным алгоритмом.

При разработке программ и алгоритмов диагностирования определено требование частоты опроса измерительной аппаратуры T_d по частоте среза F_c амплитудно-частотной характеристике модели функционирования ИПМ равной 10^{-3} с и в соответствии с теоремой

$$T_d = \frac{1}{2F_c} = \frac{1}{2 \cdot 0,001} = 500 \text{ с} \approx 8 \text{ мин}$$

Котельникова

При формировании логического механизма ввода-вывода при осуществлении принятия решений о состоянии ИПМ использованы логические переменные u , заменившие номер плавки, координаты тепловых пятен, их площадь, глубину прогара футеровки, неисправный элемент, соответствующий им. Процедура фазификации этих переменных представлена в таблице 2.

Таблица 2

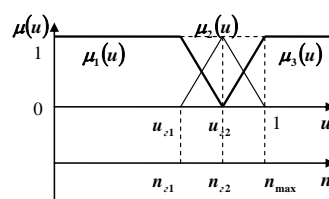
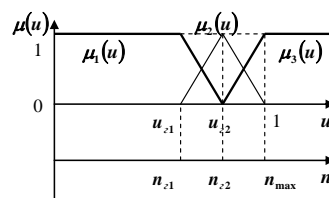
Фазификация переменных

Название переменной	Диапазон значений	Терм	Функция принадлежности
Диапазон плавков n	1...80	< 80	$\mu_1(u) = \begin{cases} 1, u \in [0, u_{r1}] \\ 1 - k_1 \frac{u - u_{r1}}{u_{r2}}, u \in [u_{r1}, u_{r2}] \\ 0, u \in [u_{r2}, 1] \end{cases}$
	80...100	От 80 до 100	$\mu_2(u) = \begin{cases} k_2(u - u_{r1}), u \in [u_{r1}, u_{r2}] \\ 1 - k_2(u - u_{r2}), u \in [u_{r2}, 1] \\ 0, u < u_{r1} \vee u > u_{r2} \end{cases}$
	> 100	> 100	$\mu_3(u) = \begin{cases} 0, u > u_{r2} \\ k_3(u - u_{r2}), u \in [u_{r2}, 1] \\ 1, u \geq 1 \end{cases}$

$$k_1 = \frac{u_{r2}}{u_{r2} - u_{r1}},$$

$$k_2 = k_3 = \frac{1}{u_{r2} - u_{r1}}$$

Название переменной	Диапазон значений	Терм	Функция принадлежности
Глубина прогара футеровки l (см)	1...5	Малый прогар	$\mu_1(u) = \begin{cases} 1, u \in [0, u_{r1}] \\ 1 - k_1 \frac{u - u_{r1}}{u_{r2}}, u \in [u_{r1}, u_{r2}] \\ 0, u \in [u_{r2}, 1] \end{cases}$
	6...11	Некритический прогар	$\mu_2(u) = \begin{cases} k_2(u - u_{r1}), u \in [u_{r1}, u_{r2}] \\ 1 - k_2(u - u_{r2}), u \in [u_{r2}, 1] \\ 0, u < u_{r1} \vee u > u_{r2} \end{cases}$
	> 11	Предельный прогар	$\mu_3(u) = \begin{cases} 0, u > u_{r2} \\ k_3(u - u_{r2}), u \in [u_{r2}, 1] \\ 1, u \geq 1 \end{cases}$
Площадь теплового пятна s	Радиус пятна менее 10 см	Точечная	$\mu_1(u) = \begin{cases} 1, u \in [0, u_{r1}] \\ 1 - k_1 \frac{u - u_{r1}}{u_{r2}}, u \in [u_{r1}, u_{r2}] \\ 0, u \in [u_{r2}, 1] \end{cases}$
	От 10 до 20 см	Средняя	$\mu_2(u) = \begin{cases} k_2(u - u_{r1}), u \in [u_{r1}, u_{r2}] \\ 1 - k_2(u - u_{r2}), u \in [u_{r2}, 1] \\ 0, u < u_{r1} \vee u > u_{r2} \end{cases}$
	Более 20 см	Большая	$\mu_3(u) = \begin{cases} 0, u > u_{r2} \\ k_3(u - u_{r2}), u \in [u_{r2}, 1] \\ 1, u \geq 1 \end{cases}$



В результате введения нечетких переменных и построения модели регистрации и диагностики состояния ИПМ была принята база правил (БП) по определению состояния модуля. БП работает по принципу поочередного применения правил, заданных последовательным списком. Такая БП является независимой от программного обеспечения и является универсальной. БП вызывается системой принятия решений при обработке данных измерений, получаемых с датчиков ИПМ.

Одной из основных проблем исследования тигельных модулей является процесс выделения информации, которая циркулирует в основном контуре программно-аппаратного комплекса и для нее актуальной является задача не только преодоления недоступности сигналов с ИПМ для наблюдения, но и не исчерпывающей информативности этих сигналов. Для диагностирования режимов техпроцесса используются такие сигналы, как величина напряжения питания и значения параметров воды на входе в систему водоохлаждения, состояния отдельных элементов ИПМ. Само по себе вычленение этих параметров неинформативно, так как усредненные значения контролируемых параметров состояния отдельных элементов не позволяют достоверно оценить динамику изменения их состояния.

Для принятия решения о неисправности, в том числе потенциальной, того или иного элемента более информативны данные о пиковых значениях температуры на поверхности объекта, а не текущие в привязке к координатам точек наблюдения, а также значения градиента температуры. Анализ методов вычленения этих оценок, показывает, что методы нечеткой логики являются наиболее предпочтительными. Поставленная задача делает использование самоорганизующихся нейронных сетей наиболее эффективным, простым и быстродействующим способом выделения областей пиковых значений характеристического параметра – температуры и позволяет осуществить привязку к координатам этих областей на

поверхности модуля, что позволит вычленивать неисправные области. В общем виде карта Кохонена создает граф подобия входных данных, представленных вещественным вектором:

$$x = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]^T \in R^n,$$

ставя ему в соответствие параметрический вещественный вектор – модель:

$$m_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{in}]^T \in R^n.$$

Расстояние между векторами x и m_i обозначено через $d(x, m_i)$, а отображение входного вектора на массив самоорганизующейся сети определяется как такой элемент массива m_c , который наилучшим образом соответствует x , т.е. тот индекс которого $c = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \{d(x, m_i)\}$.

В результате кластеризации сеть обнаруживает области близлежащих пикселей, имеющих сходное значение температуры и градиента ее роста. На выходе сети – массив, элемент которого включает номер входного воздействия (номер пикселя теплового портрета) и номер кластера. Общее число кластеров равно числу нейронов сети, которые выстраиваются в соответствии со структурой теплового портрета. Процесс функционирования СППР по диагностированию состояния модуля по ее термограмме представлен на рис. 3.

На вход СППР подается термограмма поверхности ИПМ, преобразующаяся в массив исходных данных. Этот массив обрабатывается картой Кохонена и в результате кластеризации формируется массив, содержащий координаты точек термограммы и соответствующий им номер кластера. Распределение температур по кластерам использовано для расчета площадей полученных кластеров и вычленения областей потенциального риска, предаварийного/аварийного состояния ИПМ [8], документирования и архивации параметров, и отображения результатов анализа для оператора.

Для определения поведения ИПМ использована модель Маркова [9], которая учитывает, что потенциальная вероятность выхода ИПМ из одного режима в другой не зависит от времени нахождения ИПМ в конкретном режиме, от предшествующего режима и от него самого (рис. 4).

ИПМ в течение техпроцесса может находиться в четырех основных состояниях:

1. рабочие режимы модуля, в которых вероятность надежной работы определяется величиной $P(mT)$, где m – номер плавки, T – продолжительность плавки;
2. дежурное состояние плавильного модуля;
3. контролируемый отказ, это состояние, в которое переходит модуль при обнаружении диагностической системой отказа с вероятностью D ;
4. неконтролируемый системой диагностирования отказ с вероятностью наступления $(1-D)$ – тупиковое состояние.

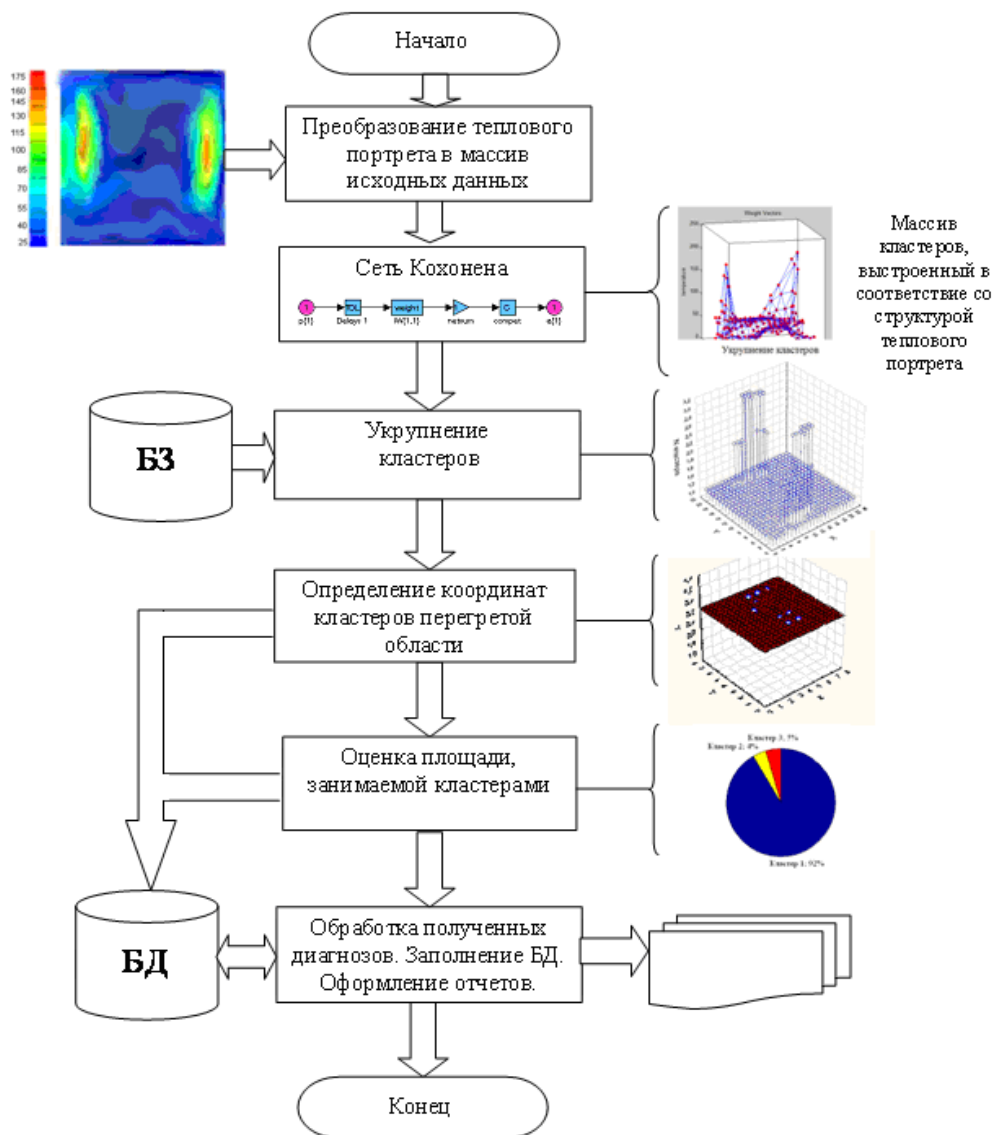


Рисунок 3. Алгоритм функционирования СППР по распознаванию состояния ИПМ

Переходы из одного режима в другой зависят от интенсивности перехода ζ , который определяет количество возможных переходов в этот режим в единицу времени.

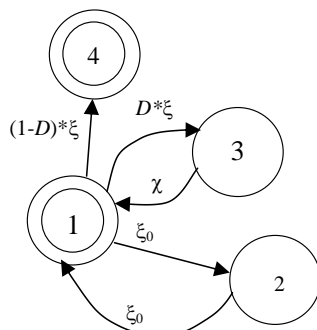


Рисунок 4. Граф, отражающий процесс функционирования ИПМ

Представленный граф [10] возможных состояний может быть описан системой взаимосвязанных дифференциальных уравнений модуля в терминах вероятностей $P_i(t)$

возможного нахождения ИПМ в предопределенных состояниях S_i и при заданных начальных условиях $P_1(0) = 1$ и $P_i(0) = 0$:

$$\begin{cases} \frac{dP_4(t)}{dt} = (1 - D) \cdot \xi P_1(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = D \cdot \xi P_1(t) - \chi P_3(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \xi_0 P_1(t) - \xi_0 P_2(t), \end{cases} \quad (1)$$

где: $P_i(t)$ - вероятность нахождения элемента ИПМ в состоянии i ($i=1, \dots, 4$), ξ -

интенсивность (частота) отказов модуля ($\xi = \frac{\text{кол-во отказов}}{\text{период времени}}$), χ - частота восстановления

футеровки модуля ($\chi = \frac{\text{кол-во событий}^{-1}}{\text{период времени}}$).

К системе (1) должно быть добавлено условие нормирования:

$$\sum_{i=1}^4 P_i(t) = 1$$

В результате получены вероятности выхода из строя ИПМ, характеризующие ее поведение (рис. 7 а, б, в) как при отсутствии СППР (рис. 5), так и при наличии системы распознавания состояния с охватом части контролируемых параметров ИПМ (рис. 6).

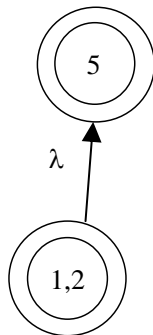


Рисунок 5. Модель поведения ИПМ без распознавания режимов работы

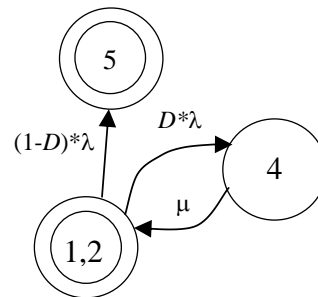
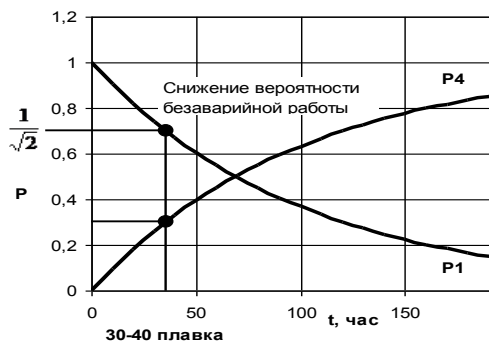
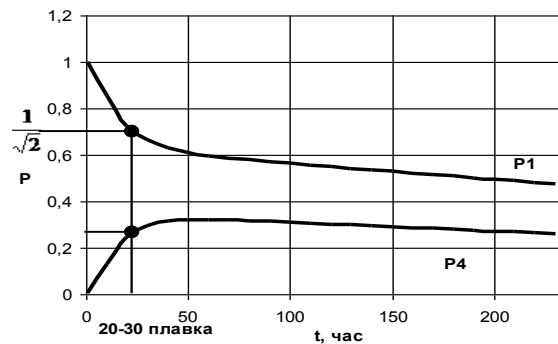


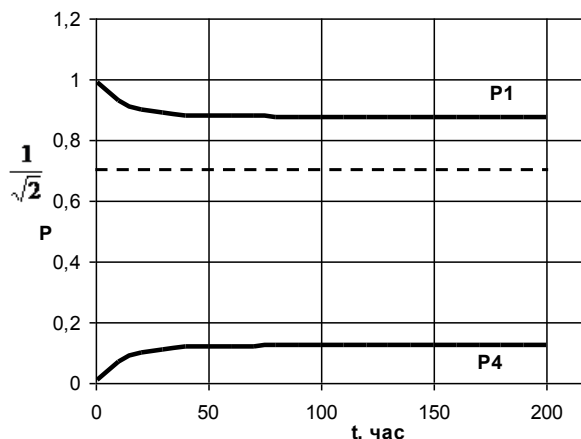
Рисунок 6. Модель ИПМ, учитывающая наличие системы диагностирования с охватом части (0,5) контролируемых параметров



а)



б)



в)

Рисунок 7. Вероятности безаварийной работы (P_1) и выхода из строя (P_4): а) без системы распознавания режимов; б) при наличии системы распознавания, основанной на измерении усредненной температуры и в) системы распознавания с нечетким алгоритмом управления

Заключение

В результате проведенных исследований разработан метод вычленения и распознавания неисправности по термограмме поверхности ИПМ основанный на использовании нечеткого алгоритма управления; проведена оценка рисков эксплуатации ИПМ. Разработан алгоритм, обеспечивающий сбор, обработку и хранение термографических изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мизгир А.Г., Аладьев Р.Е. Современные системы автоматизации процессов плавки стали в индукционных и электродуговых печах // *Литье и металлургия*. - №3 (67). 2012. – С. 258-259.
2. Доч Э., Форстховель К., Рише М. Высокий уровень эксплуатационной готовности и безопасность при индукционной плавке. – *Литейное производство и технология литейного дела*. – 2015. – С. 10-15.
3. Новые возможности решения специальных технологических задач при индукционной плавке металлов в полях средней и низкой частоты) [Электронный ресурс] / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, С.А. Рачков, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, К.В. Якушев // Российская электротехническая компания. – Екатеринбург. – 2008. – Режим доступа: http://www.reltec.biz/ru/txt_052.php.
4. Калявин В.П., Рыбаков Л.М. Надежность и диагностика электроустановок [Текст]: Учебное пособие. / Мар. гос. ун-т. – Йошкар-Ола. – 2000. – 348 с.
5. Галямина И.Г. Управление процессами: Учебник для вузов. Стандарт третьего поколения. – СПб.: Питер, 2013. – 304 с.
6. Шапкин А.С., Шапкин В.А. Теория риска и моделирование рисков ситуаций. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2007. – 880 с.
7. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010. - 655 с.
8. Костюкова А.П. Система поддержки принятия решений по диагностированию состояния индукционных плавильных установок [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 23.06.11 / Костюкова Анастасия Петровна. – М.: ПроСофт-М, 2011 – 111 с.
9. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика в задачах и упражнениях: Учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 270 с.
10. Гузаиров М.Б., Костюкова А.П. Системы диагностирования рисков эксплуатации сложносвязанных нагревательных объектов // *Естественные и технические науки*. - 2010. №6. - С. 456 – 461.

Kostyukova Anastasiya Petrovna
Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa
E-mail: ktp@ufanet.ru

The automated system for monitoring, identification and registration of status of induction melting modules

Abstract. The article considers a relevant issue of increasing probability of the failure-free operation of the induction melting of metals and alloys. However, at the present time the modern foreign and Russian literature gives lack of attention to the potential risk events possible in the course of the induction melting modules maintenance.

In this article the author presents a developed SOM (Self-Organizing Maps), Kohonen Maps, - based concept of algorithm development of a fuzzy control for a production process by means of analysis of the external temperature portrait of module, including isolation, recognition, registration, classification, clustering and diagnostics of heat stains with a temperature above the operating values. The main factors having an effect on the operability of manufacturing equipment for metal melting and the main parameter that determines the potential risk events accompanying the technological process and characterizing a trouble-free operation of melting modules were identified on the basis of the construction of Ishikawa diagrams. To determine the behavior of induction melting modules, Markov model was used.

As a result, the author defined populations of controlled parameters of technological process, the probabilities of potential workers and emergency situations, that confirmed the accuracy of the research carried out by the author. Model for calculation of the average expected error of prediction was given. The article presents algorithm that provides collection, processing and storage of thermography images underlying the workstation of the melting module operator.

Keywords: induction melting modules; thermogram; fault; isolation; recognition; registration; risk events; self-organizing maps; a neuron network; probability

REFERENCES

1. Mizgir A.G., Alad'ev R.E. Sovremennye sistemy avtomatizatsii protsessov plavki stali v induktsionnykh i elektrodugovykh pechakh // Lit'e i metallurgiya. - №3 (67). 2012. – С. 258-259.
2. Doch E., Forstkhovel' K., Rishe M. Vysokiy uroven' ekspluatatsionnoy gotovnosti i bezopasnost' pri induktsionnoy plavke. – Liteynoe proizvodstvo i tekhnologiya liteynogo dela. – 2015. – S. 10-15.
3. Novye vozmozhnosti resheniya spetsial'nykh tekhnologicheskikh zadach pri induktsionnoy plavke metallov v polyakh sredney i nizkoy chastoty) [Elektronnyy resurs] / V.I. Luzgin, A.Yu. Petrov, S.A. Rachkov, F.N. Sarapulov, S.F. Sarapulov, K.V. Yakushev // Rossiyskaya elektrotekhnicheskaya kompaniya. – Ekaterinburg. – 2008. – Rezhim dostupa: http://www.reltec.biz/ru/txt_052.php.
4. Kalyavin V.P., Rybakov L.M. Nadezhnost' i diagnostika elektroustanovok [Tekst]: Uchebnoe posobie. / Mar. gos. un-t. – Yoshkar-Ola. – 2000. – 348 s.
5. Galyamina I.G. Upravlenie protsessami: Uchebnik dlya vuzov. Standart tret'ego pokoleniya. – SPb.: Piter, 2013. – 304 s.
6. Shapkin A.S., Shapkin V.A. Teoriya riska i modelirovanie riskovykh situatsiy. – M.: Izdatel'sko-torgovaya korporatsiya «Dashkov i Ko», 2007. – 880 s.
7. Kokhonen T. Samoorganizuyushchiesya karty. – M.: Binom. Laboratoriya znaniy, 2010. - 655 s.
8. Kostyukova A.P. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy po diagnostirovaniyu sostoyaniya induktsionnykh plavil'nykh ustanovok [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 23.06.11 / Kostyukova Anastasiya Petrovna. – M.: ProSoft-M, 2011 – 111 s.
9. Ayvazyan S.A., Mkhitaryan V.S. Prikladnaya statistika v zadachakh i uprazhneniyakh: Uchebnik dlya vuzov. – M.: YuNITI-DANA, 2001. – 270 s.
10. Guzairov M.B., Kostyukova A.P. Sistemy diagnostirovaniya riskov ekspluatatsii slozhnosvyazannykh nagrevatel'nykh ob"ektov // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. - 2010. №6. - S. 456 – 461.