

16. Michalewicz, Z. Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs [Text] / Z. Michalewicz. – Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1996. – 387 p. doi: 10.1007/978-3-662-03315-9
17. Rechenberg, I. Evolutionsstrategie “94” [Text] / I. Rechenberg. – Stuttgart-Bad GannStatt: Frommann Halzboog, 1994. – 434 p.
18. Тимченко, А. А. Основы информатики системного проектирования объектов новой техники [Текст] / А. А. Тимченко, А. А. Родионов. – К.: Наук. думка, 1991. – 231 с.
19. Ларичев, О. И. Теория и методы принятия решений [Текст] / О. И. Ларичев. – М.: Логос, 2003. – 392 с.
20. Саати, Т. Аналитическое планирование организации систем [Текст] / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

Показано, що параметри об'єктів ливарного виробництва належать, як правило, до важковимірюваних, що створює серйозні метрологічні проблеми при організації АСУ такими процесами. Запропоновано систему вибору метрологічного забезпечення, яке містить отримання просторово-часового відображення від об'єкта та його згортки до результату вимірювання, засновану на класифікації за допомогою нейронних мереж Кохонена з відкритою множиною класів

Ключові слова: складні системи, метрологічне забезпечення, параметри, які важко вимірюються, карта Кохонена

Показано, что параметры объектов литейного производства относятся, как правило, к трудноизмеримым, что создает серьезные метрологические проблемы при организации АСУ такими процессами. Предложена система выбора метрологического обеспечения, включающая получение пространственно-временного отображения от объекта и его свертки к результату измерения, основанная на классификации с помощью нейронных сетей Кохонена с открытым множеством классов

Ключевые слова: сложные системы, метрологическое обеспечение, трудноизмеримые параметры, карта Кохонена

УДК 006.91:004.942

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.32420

ВЫБОР МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ТРУДНОИЗМЕРИМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Г. А. Оборский

Доктор технических наук, профессор
Кафедра металлорежущих станков,
метрологии и сертификации*

E-mail: rector@opu.ua

А. Л. Становский

Доктор технических наук, профессор
Кафедра нефтегазового и химического машиностроения*

E-mail: stanovsky@mail.ru

И. В. Прокопович

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра технологии и управления литейными процессами*

E-mail: igor.prokopovich@gmail.com

М. А. Духанина

Кафедра нефтегазового и химического машиностроения*

E-mail: marianna.dukhanina@gmail.com

*Одесский национальный политехнический университет
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

1. Введение

Для эффективного управления современным литейным производством человеко-машинная АСУ должна получать от всех его переделов как можно больше *on-line* информации. Это обстоятельство предполагает наличие в составе АСУ постоянно действующей разветвленной метрологической подсистемы. Она должна успешно работать с трудноизмеримыми,

то есть быстроизменяющимися, многомерными, широкодиапазонными, физически труднодоступными, зачастую искусственно скрывааемыми персоналом и «отложенными» во времени параметрами.

Очевидно, что такая метрологическая подсистема должна быть адаптивной с точки зрения методов измерений ко всему многообразию литейных объектов (от холодного дерева до горячего металла) и ко всем изменениям, которым эти объекты подвергаются в

процессе запланированной технологии и стохастических внешних воздействий.

Поэтому исследования, направленные на разработку новых универсальных подходов к выбору метрологического обеспечения, позволяющих без существенных дополнительных временных и материальных затрат повышать качество отливок, являются весьма актуальными.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Сложная техническая система – это единая конструктивная совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем, предназначенная для целенаправленных действий с задачей достижения в процессе функционирования заданного конечного результата [1, 2]. Поэтому эффективное автоматизированное управление такими процессами должно учитывать не только итоговые результаты, получаемые на выходе, но и все промежуточные параметры, несущие важнейшую информацию для системы управления в целом. Учитывать же такие параметры – это, прежде всего, иметь возможность их измерить.

Отсюда вытекает, что важной подпроблемой управления сложными технологическими процессами является подпроблема измерений. Она еще больше усугубляется, если процессы быстротекущи, так как в этом случае на точные измерения остается сравнительно мало времени.

Ярким примером такого объекта является литейное производство, – понятие, объединяющее сегодня более сотни существенно различающихся основных и специальных способов литья [3]. С одной стороны, оно состоит из отдельных подсистем с четко выраженными границами (формовка, плавка, заливка, выбивка и т. д.), а с другой, – безусловные быстротекущность, стохастичность, нестационарность, высокоинтенсивность, многомерность, многоэкстремальность и многокритериальность основных литейных процессов относят последние к категории сложных и создают дополнительные подпроблемы, прежде всего, в области метрологии, без которой, как известно, не может быть эффективного управления. В итоге, количество брака в современном литейном производстве остается большим, например, для среднеуглеродистых сталей до 20–30 %.

С другой стороны, сложность литейного производства входит в противоречие с классической теорией автоматического управления (ТАУ), которая, как правило, в этих условиях малоэффективна. Действительно, существующие разделы ТАУ требуют строгого математического описания процессов литья в виде классических уравнений (что возможно лишь в случае моделирования термодинамически самопроизвольных явлений), однозначного взаимовлияния переменных характеристик процессов, стабильности параметров, ограниченности (лучше всего – единственности) управляющих воздействий, ограничений на возмущение и т. п. [2, 4]. Все это выдвигает основное требование к результатам измерений в АСУ – они должны быть *с математической точки зрения простыми*.

Подпроблемы сложности литейного производства естественным образом транспонируются в проблемы метрологического обеспечения: получая на входе сложные пространственно-временные отображения объекта измерений, эти обеспечения должны преобразовать их к виду, удобному для использования в АСУ. В то же время, только у одного простого изображения – некоторой «картинки», по которой вынуждены принимать решения технологи, около 20 миллионов параметров, а если речь идет о видеопотоке, то это очень большое число еще многократно возрастает!

Понятно, что управлять любым объектом, имея такой «результат измерения», чрезвычайно сложно. Необходимо резко уменьшить размерность исходных данных, свернув их к одному числу, причем это число не может исчисляться просто (например, как среднее арифметическое), а должны отображать весь спектр распределения информации, содержащейся в том же изображении [5, 6]. К сожалению, известные методы рассчитаны на весьма медленные процессы с небольшим разбросом единственного измеряемого параметра [7, 8].

Перечисленные локальные подпроблемы могут быть сведены к основной проблеме настоящего исследования: проблеме эффективного и обоснованного выбора видов метрологического обеспечения и методов измерений для всего многообразия процессов и технологий литья, а также пополнения множества этих методов новыми, когда конкретное производство ставит перед АСУ такие вызовы.

Практически все существующие методы измерений параметров сложных технических систем являются косвенными: на первом этапе от объекта измерения получается некоторое пространственно-временное отображение (ПВО), а затем это отображение сворачивается (например, с помощью компьютера) в некоторое абстрактное или размерное число (вектор), являющееся, собственно, результатом измерения (РИ) [9, 10]. И методов получения ПВО от объектов литейного производства, и методов сверток этих ПВО существует достаточного много. К первым относятся различного вида «измерения в точке» (например с помощью термомпар), фото и киносъемка в видимых, инфракрасных и рентгеновских лучах [5–8], физические методы неразрушающего [11] и разрушающего [12] контроля, методы внедрения внешних идентификаторов в техническую [13] и организационную подсистемы, а также многие другие.

Ко вторым можно отнести различные аналитические [14] и фрактальные методы, методы интеллектуальной обработки числовых массивов и пр.

Произведение этих множеств создает супермножество возможных методов измерений, к выбору которых в каждом конкретном случае необходимо подходить с особой тщательностью, т. к. неадекватные результаты измерений сказываются на главном итоге литейного производства – качестве отливок [3].

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение качества отливок и эффективности литейного производства путем разработки системы выбора метода измерений

для каждого конкретного объекта, составляющего это производство, и для управления которым в условиях изменяющихся внутренних и внешних воздействий постоянно необходимы численные характеристики его текущего состояния.

Для достижения этой цели в работе было необходимо решить следующие задачи:

- предложить систему многоцелевой многомерной *on-line* классификации параметров объекта измерения, в которой каждому классу соответствует рекомендуемый метод измерения;

- разработать способ расширения перечня предлагаемых методов измерений, основанный на выявлении и идентификации новых классов параметров объектов измерения с помощью нейронной сети Кохонена;

- создать подсистему метрологического обеспечения процесса оценки качества отливок «CASTMEAS» и выполнить практические испытания этой подсистемы на примере метрологического обеспечения технологии заливки стали в песчаные литейные формы.

4. Выбор методов измерений для метрологического обеспечения автоматизированной системы управления технологическим процессом

Управление технологическим производственным процессом предполагает наличие информации о состоянии всех этапов процесса в реальном времени, которую можно получить только в результате непосредственного измерения. Для этого в АСУ ТП создается система метрологического обеспечения \mathbf{M} , основанного на различных, определяемых параметрами «точек измерения» $\mathbf{P}_i(p_{1i}; p_{2i}; \dots; p_{di})$ ($i=1, \dots, t$; $d=1, \dots, D$), методах измерений m_i :

$$\mathbf{M} = \langle m_1; m_2; \dots; m_t \rangle, \quad (1)$$

где t – количество рассматриваемых методов измерений; D – количество параметров (размерность) «точек измерения».

Таким образом, задача выбора методов измерений для метрологического обеспечения АСУ ТП \mathbf{M} фактически представляет собой задачу многоцелевой (для каждой «точки измерения») многомерной классификации параметров \mathbf{P} , где каждому классу соответствует один метод измерений m .

Существенной особенностью такой классификации является то, что не все методы измерений к началу выбора известны, т. е. у лица, занимающегося классификацией, нет уверенности в том, что обеспечением для новой «точки» не является какой-нибудь новый, не описанный ранее метод.

Действительно, если множество методов конечно и полностью описано, задача классификации даже для большого количества многомерных входных наборов признаков \mathbf{P} выглядит тривиальной. В противоположном гипотетическом случае, когда не известен ни один метод и нет списка возможных методов измерений, может быть применен интеллектуальный процесс, когда система классификации сама создает классы признаков, которые пользователь может соотносить с отдельными методами измерений m [15].

В общем случае может иметь место промежуточный вариант, когда набор признаков может означать уже известный метод измерения объекта m , а может представлять что-то новое, пока не известное, не имеющее даже названия. В этом случае интеллектуальная система продолжает обучение во время работы, пополняя множество имеющихся у нее в базе данных измерительных методов новыми.

Пусть группе близких в некотором смысле входных наборов признаков $\mathbf{P}_i(p_{1i}; p_{2i}; \dots; p_{di})$ соответствует только один поименованный класс. Иными словами, примем, что близким входным векторам $\mathbf{P}_i(p_{1i}; p_{2i}; \dots; p_{di})$ соответствует один метод измерений $m \in \mathbf{M}$. В общем случае это не обязательно. Поэтому такому подходу к классификации следует относиться с вероятностной точки зрения: возможна ошибка! Но ведь и при любом другом способе выбора ошибка из-за того, что одинаковым входным набором признаков могут соответствовать различные методы, не исключена.

При решении задачи метрологической классификации, отличающейся открытым множеством возможных классов (методов измерений), использовали интеллектуальный подход, который называется «кластеризацией с помощью самоорганизующихся нейронных сетей» типа сетей Кохонена [16]. Суть этого подхода состоит в том, что нейрон с вектором веса, наиболее близким к вектору входа $\mathbf{P}_i(p_{1i}; p_{2i}; \dots; p_{di})$, выигрывает конкуренцию в борьбе за этот вектор. Последующий рекуррентный алгоритм приведет к тому, что, когда на вход сети поступит достаточно большое количество векторов \mathbf{P}_i , каждая группа близких из них окажется связанной только с одним из нейронов слоя. Одним из недостатков сети Кохонена считается то обстоятельство, что при достаточно большом количестве нейронов и высокой «кучности» входных векторов некоторые нейроны окажутся незадействованными.

Это проявляется в том, что нейроны, имеющие начальные весовые векторы Ψ , значительно удаленные от предъявленных векторов входа \mathbf{P} , никогда не выигрывают конкуренции, независимо от того, как долго продолжается обучение. В результате оказывается, что такие векторы не используются при обучении и соответствующие им нейроны никогда не оказываются победителями. Такие нейроны называют «мертвыми», так как они не выполняют никакой полезной функции.

При классификации с открытым множеством классов «мертвые» нейроны являются уже достоинством подхода. Если вновь предъявляемый входной вектор окажется, например, ближе всего к вектору весов нейрона Ψ , но мера этой близости, даже притом, что она минимальна, будет больше некоторого установленного порога, то нейрон с вектором весов Ψ не будет признан победителем и новый вектор ему «не отдадут». Вместо этого будет «реанимирован» один из мертвых нейронов, при этом ему будут установлены такие веса, чтобы входной вектор им полностью соответствовал. Сам же «реанимированный» нейрон с этого этапа обучения станет центром нового кластера, реализуя тем самым процесс расширения множества классов [17, 18].

На основании такого подхода для участия в процессе выбора методов измерения предлагается комплексированная нейронная сеть (КНС), состоящая из нейронных сетей двух конфигураций: «обычная»

трехслойная сеть прямого распространения и карта Кохонена.

Работа такой комплексированной сети начинается с «подготовки» первого вектора входа P_1 , который будет предъявляться карте Кохонена для диагностики. Размер промежуточного слоя в сети прямого распространения определялся из соображений оптимизации процесса обучения при сохранении необходимой вероятности классификации.

На рис. 1 приведена схема распределения весов нейронов слоя Кохонена в процессе его работы и одновременного обучения. «Холмы» с центрами над наиболее часто побеждавшими нейронами соответствуют методам измерений из известного списка методов.

«Мертвый» нейрон ожидает момента, когда системе в процессе классификации будет предъявлен достаточно далекий от «существующих» классов входной вектор признаков P .

Сеть Кохонена обладает еще одним весьма полезным для нашего применения качеством: если вокруг какого-то метода измерений группируется слишком много векторов («холм» на рис. 1 становится слишком большим), то он разбивается на отдельные подметоды, т.е. процесс классификации как бы приближается к объекту, рассматривает его через «увеличительное стекло» [16].

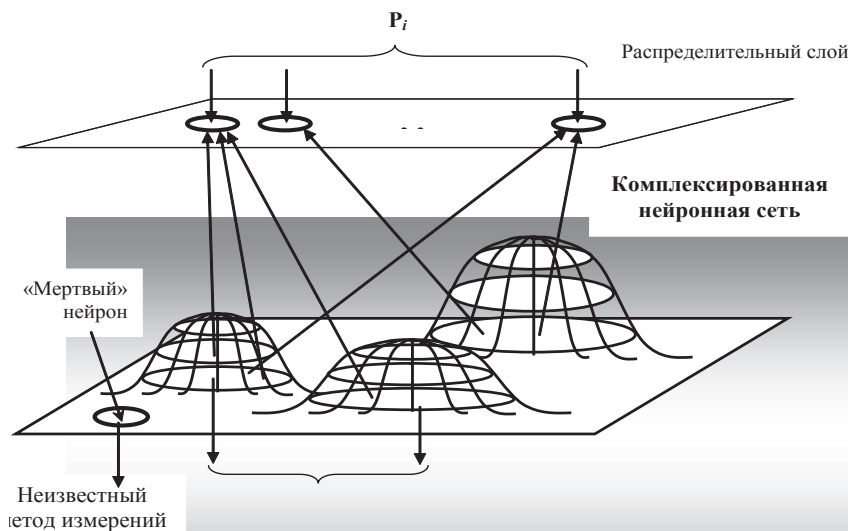


Рис. 1. Схема распределения весов нейронов слоя Кохонена в результате работы-обучения

Алгоритм процесса выбора метода измерения с помощью КНС выглядит следующим образом.

1. Формирование обучающей выборки.
2. Формирование архитектуры комплексированной нейронной сети.
3. Обучение НС прямого распространения.
4. Обучение комплексированной нейронной сети.
5. Нормирование вектора исходных данных и получение нормированного вектора V .
6. Предъявление вектора V комплексированной нейронной сети. Сеть прямого распространения, входящая в КНС, преобразует V в вектор усредненного образца – вектор $Z_{вх}$.
7. Вычисление отклика нейронов слоя Кохонена:

$$q_j = \sum_{i=1}^{N_1} w_{ij} u_i^k, \quad j = \overline{1, N_{v+1}}, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad k = \overline{1, N}. \quad (2)$$

8. Выбор нейрона-победителя:

$$c(q_{max}) = \arg \max \{q_j\}, \quad j = \overline{1, N_{v+1}}; \quad (3)$$

9. Корректировка весов связей слоя Кохонена:

$$w_{ij}^{n+1} = w_{ij}^n + \chi f^L(d_{ij})(u_i - w_{ij}^n),$$

$$i = \overline{1, N_1}, j = \overline{1, N_{v+1}}. \quad (4)$$

Возбуждение в окрестности «истинного» всех «ложных» нейронов и подача с их выхода сигналов в обратном направлении:

$$u_i = \sum_{j=1}^L w_{ij} q_j^k. \quad (5)$$

11. Получение на выходе КНС вектора признаков ситуации, соответствующих прототипу – усредненно-му образцу.

12. Расчет метрики между вектором входом и вектором, возвращенным КНС по формуле:

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i (Z_{вхi} - Z_{возi})^2}, \quad (6)$$

где N – количество компонентов векторов входа $Z_{вх}$ и возврата $Z_{воз}$; $Z_{вхi}$ – компонент вектора входа; $Z_{возi}$ – компонент вектора возврата; w_i – вес, с которым отклонение по i -му компоненту входит в R .

Благодаря введению в формулу метрики весовых коэффициентов, появляется возможность учесть влияние конкретных признаков на установление того или иного метода измерений. На начальном этапе для всех весов устанавливается значение 1.

Далее эти веса корректируются по результатам экспериментальных исследований и практических данных.

13. Сравнение метрики R с предельно допустимым значением R_{max} . Если $R < R_{max}$, то класс, соответствующий нейрону-победителю, признается установленным. Если $R > R_{max}$, то признается, что в банке данных класса, соответствующего $Z_{вх}$, нет.

14. Выбирается один из «мертвых» нейронов и «оживляется» путем добавления соответствующего смещения, вносимого в его формулу. Величина смещения подбирается таким образом, чтобы этот нейрон стал победителем в борьбе за вектор $Z_{вх}$, который не достался ни одному из побеждавших ранее нейронов. Этот же нейрон становится в последующем центром нового класса.

Однако, в случае создания нового класса с помощью КНС задача его применения еще не решена, так как КНС обозначает только абстрактное название класса (например, номер), но ничего не говорит о том, что

является его сутью, и как этот класс измерений практически реализовать. Для решения задачи привлекаются эксперты, по требованию которых им сообщается вся информация об объекте и системе управления в целом, а также осуществляются дополнительные анализы, мониторинг по новым переменным, выполняется эксперимент. Задача экспертов: во-первых, «насытить» информацию о новом методе измерений, существующем пока только в виде абстрактного имени (номера), данных о его фактическом названии, во-вторых, предложить возможные пути практической реализации метода. Для этого в состав экспертной группы включаются опытные специалисты как в области метрологического обеспечения соответствующей АСУ, так и в предметной области объекта автоматизации.

Рассмотрим в качестве конкретного примера некоторое универсальное метрологическое обеспечение подсистемы АСУ литейным производством, а именно – литьем стальных отливок в песчано-глинистые формы, которое позволяет осуществлять выбор методов измерений при $D=6$. При этом к шести компонентам вектора P относятся: p_1 – вид литейного объекта, p_2 – уровень его дискретизации при

моделировании, p_3 – передел литейного производства, p_4 – динамический тип процесса, p_5 – цель измерений и p_6 – временной «срез» его осуществления (рис. 2).

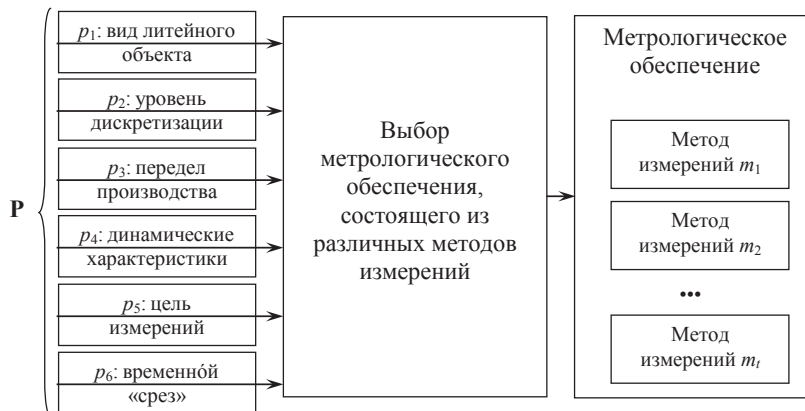


Рис. 2. Схема выбора метрологического обеспечения АСУ ТП

В приведенном примере все компоненты векторов $P_i(p_{1i}; p_{2i}; \dots; p_{6i})$ дискретны, они обозначаются условными номерами и их можно представить в виде шестимерного дискретного параллелепипеда, в ячейках которого располагаются конкретные наборы возможных сочетаний номеров значений входных характеристик. В табл. 1–3 представлены возможные сечения такого шестимерного параллелепипеда [19, 20].

Таблица 1

Сечение шестимерного параллелепипеда по видам и уровням дискретизации сложных литейных объектов

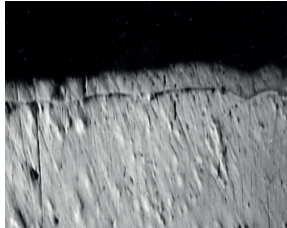


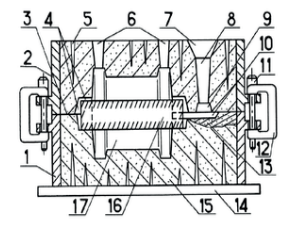

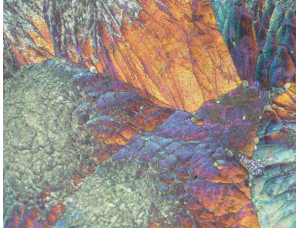
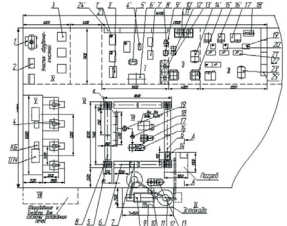
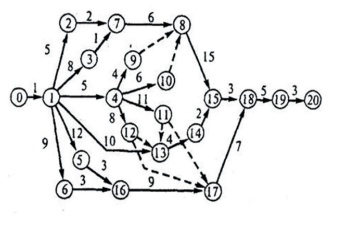

p_2 – Уровни дискретизации литейных объектов	p_1 – Виды литейных объектов		
	1 – устройство	2 – способ	3 – вещество
1 – МИКРО (дифференциальные уравнения в частных производных)	Нанопокртия на отливках 	Процессы переноса: теплопередача, диффузия, поток жидкости, газа 	Неизотропные гомогенные материалы, элементы гетерогенных сред 
2 – МАКРО (обыкновенные дифференциальные уравнения)	Литейная форма и ее элементы. Литейное оборудование и его узлы, оснастка 	Литейная технология. Способы литья. Плавка, формовка, заливка 	Гетерогенные материалы: сплавы, смеси, составные системы 
3 – МЕТА (эмпирические алгебраические уравнения)	Литейных цех, завод 	Организация литейного производства в целом: планирование, управление 	Экосистемы литейного производства: выбросы и отвалы 

Таблица 2

Сечение шестимерного параллелепипеда по характеристикам процессов в подсистемах литейного производства

p ₄ – Динамические типы литейного процесса	p ₃ – Подсистемы литейного производства		
	1 – металлургия	2 – качество отливок	3 – экология
1 – быстротечность	☑	–	–
2 – стохастичность	–	☑	☑
3 – нестационарность	☑	–	–
4 – высокоинтенсивность	☑	–	–
5 – многомерность	–	☑	☑
6 – многоэкстремальность	–	☑	☑
7 – многокритериальность	☑	–	☑

Таблица 3

Сечение шестимерного параллелепипеда по целям и «срезам» измерений

p ₅ – Цели	p ₆ – «Срезы» измерений			
	1 – исходный	2 – промежуточный	3 – финишный	4 – внешний
1 – управление	Выходы управления	Переходы между подсистемами	Качество отливок	Результат управления во внешней среде (экология)
2 – эксперимент	Исходные данные и параметры	Промежуточные результаты	Окончательные результаты	Результаты технологической деятельности
3 – диагностика	Данные об объекте и его текущем состоянии	Результаты тестирования	Поддержка принятия решения	Выявление причин экологических нарушений

Пример. Пусть необходимо измерять температуру металла в ковше при заливке отдельных форм (предполагается, что с одного ковша заливается несколько форм). Для конкретной «точки измерения» в процессе заливки формы шестимерный кортеж для **P** будет иметь следующий вид :

$\langle p_1 - 2 \text{ (способ)}, p_2 - 2 \text{ (макроуровень)}, p_3 - 1 \text{ (металлургия)}, p_4 - 4 \text{ (высокоинтенсивность)}, p_5 - 1 \text{ (управление)}, p_6 - 2 \text{ (промежуточный)} \rangle$.

В табл. 4 приведен перечень методов измерений $m \in M$, состоящих из получения и свертки пространственно-временных отображений от объекта измерения. Подавая числа $\langle 2, 2, 1, 4, 1, 2 \rangle$ на вход обученной КНС, получим в итоге рекомендуемый метод измерений из известных системе выбора методов, представленных в табл. 4:

$m_p = \langle 2 \text{ (фотография)}, 1 \text{ (аналитическое преобразование)} \rangle$.

Направления дальнейшего совершенствования предложенного подхода связаны со следующими обстоятельствами:

– выявление, описание и разработка новых методов измерений, дополняющих табл. 4;

– формирование исходного вектора признаков **P** в тех случаях, когда некоторые его компоненты соответствуют нескольким номерам в табл. 1–3 (например, измеряемый процесс может быть не только высокоинтенсивным, но и быстротекущим);

– разработка условий, при которых пользователю для одной «точки измерения» может быть предложено несколько методов, представленных в табл. 4.

Таблица 4

Открытый перечень методов получения и свертки пространственно-временных отображений от объекта измерения

Методы получения пространственно-временных отображений	Метод свертки			
	1 – аналитическое преобразование	2 – фрактальное преобразование	3 – сжимающие отображения	Пока неизвестные методы свертки
1 – прямое измерение «в точке»	–	–	–	...
2 – фотография	☑	☑	☑	...
3 – томография	☑	☑	☑	...
4 – видеопоток	☑	–	–	...
5 – физические методы	–	–	☑	...
Пока неизвестные методы получения ПВО

5. Выводы

В работе предложена система многоцелевой многомерной *on-line* классификации параметров объекта измерения, основанная на нейронной сети Кохонена, в которой каждому классу из открытого множества соответствует рекомендуемый метод измерения.

Для этой системы разработан способ расширения перечня предлагаемых методов измерений, основанный на выявлении и идентификации новых классов параметров объектов измерения. Для этого в сети Кохонена при необходимости оживляются «мертвые» нейроны, вокруг которых и формируется новый класс, лежащий в основе исследований, направленных на создание новых методов измерений.

В литейном цехе ПуАО «Бердичевский машиностроительный завод «Прогресс»» были проведены испытания подсистемы метрологического обеспечения в области оценки качества отливок «CASTMEAS» (*measurement of castings*) при управлении технологическим процессом литья стальных отливок «Барaban» в песчаные формы. В результате производственных испытаний установлено, что использование разработанной подсистемы метрологического обеспечения «CASTMEAS» позволило уменьшить количество дефектных отливок приблизительно на 35 % от начального значения.

Литература

1. Тонконогий, В. М. Управление объединенными технологическими процессами [Текст] / В. М. Тонконогий // Труды Одесского политехнического университета. – 2004. – Вып. 1(21). – С. 96–101.
2. Тонконогий, В. М. Трехконтурная АСУ нанесением ионно-плазменного покрытия на режущий инструмент [Текст] / В. М. Тонконогий // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2004. – Вып. 1 (13). – С. 185–189.
3. Лысенко, Т. В. Управление качеством отливок [Текст] / Т. В. Лысенко // Труды Одесского политехнического университета. – 2004. – Вып. 1(21). – С. 20–22.
4. Тонконогий, В. М. Композиционный гистерезис при построении моделей технологических процессов [Текст] : матер. XI семинара / В. М. Тонконогий, Л. М. Перпери // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – Одесса: ОНПУ, 2004. – С. 11–12.
5. Оборский, Г. А. Измерение параметров внутренних тепловых процессов по инфракрасным видеопотокам от поверхности детали [Текст] / Г. А. Оборский, В. М. Рязанцев, Ю. В. Шихирева // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – 2013. – Вып. 8. – С. 124–132.
6. Становский, П. А. Автоматизированный мониторинг протекания технологических процессов с помощью низкочастотных видеопотоков [Текст] / П. А. Становский, Л. В. Бовнегра, Ю. В. Шихирева // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – 2012. – Вып. 25, Ч. II. – С. 70–74.
7. Бовнегра, Л. В. Метод оценки износа режущего инструмента с помощью параболического преобразования видеопотока со сходящей стружки [Текст] / Л. В. Бовнегра, Ю. В. Шихирева, Т. И. Носенко // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С.Пухова. – 2012. – Вып. 65. – С. 60–67.
8. Мещеряков, В. И. Устройство обработки изображений высокотемпературных теплофизических полей [Текст] : тр. отрасл. совещ. / В. И. Мещеряков // Оптические методы и способы обработки данных теплофизических и нейроннофизических процессов в элементах энергоэлектроники, 1990. – С. 12–13.
9. Шихирева, Ю. В. Интеллектуальное информационное обеспечение тепловых измерений [Текст] : матер. XX науч.-тех. семинара / Ю. В. Шихирева, Л. В. Бовнегра // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – Одесса, 2012. – С. 32–34.
10. Бовнегра, Л. В. Параболическое преобразование цветного видеопотока [Текст] : матер. XX науч.-тех. семинара / Л. В. Бовнегра, П. А. Становский, Ю. В. Шихирева // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – Одесса, 2012. – С. 28–32.
11. Становский, А. Л. Неразрушающий метод измерения плотности фрагментов песчаных литейных форм [Текст] / А. Л. Становский, И. В. Прокопович, М. А. Духанина // Збірник наукових праць. «Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві». – 2013. – Вып. 4(5). – С. 104–110.
12. Становский, А. Л. Физический метод оценки плотности отливок [Текст] : матер. XIII міжн. наук.-тех. конф. / А. Л. Становский, И. В. Прокопович, М. А. Духанина // Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах, 2012. – С. 33–34.
13. Становский, А. Л. Применение структурных идентификаторов состояния в литейном производстве [Текст] : матер. межд. науч.-прак. конф. / А. Л. Становский, И. В. Прокопович, М. А. Духанина // Литье. Металлургия. 2013, 2013. – С. 193–194.
14. Становский, П. А. Параболическое преобразование полноцветного видеопотока от тепловизора [Текст] / П. А. Становский, Л. В. Бовнегра, Ю. В. Шихирева // Праці Одеського політехнічного університету. – 2012. – Вып. 2 (39). – С. 67–71.
15. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей [Текст] / Р. Каллан. – М.: Вильямс, 2001. – 288 с.
16. Медведев, В. С. Нейронные сети [Текст] / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
17. Налева, Г. В. Диагностика латентных нарушений процесса получения композитных инструментальных материалов [Текст] / Г. В. Налева // Теорія і практика процесів. Подрібнення, розділення, змішування і ущільнення: Збірник наукових праць. – 2005. – Вып. 11. – С. 71–78.
18. Налева, Г. В. Экспертная диагностика скрытых повреждений [Текст] : тр. XII семинара / Г. В. Налева // Моделирование в прикладных научных исследованиях, 2004. – С. 61–62.
19. Становский, А. Л. Разработка методов оптимизации тепломассообмена с помощью фрактальных сверток компьютерных томограмм [Текст] / А. Л. Становский, О. С. Савельева, И. В. Прокопович, А. В. Торопенко, М. А. Духанина // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 5, № 5 (71). – С. 4–9. doi: 10.15587/1729-4061.2014.27978
20. Оборский, Г. А. Управление сложными объектами литейного производства с помощью пространственно-временных отображений [Текст] : матер. XXI науч.-тех. семинара / Г. А. Оборский, А. Л. Становский, И. В. Прокопович // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – 2013. – Т. 2. – С. 100–102.