

23. Richharia, M. An Improved Step Track Algorithm for Tracking Geosynchronous Satellites [Text] / M. Richharia // Int. J. of Sat. Comm. – 1986. – No 4. – P.P. 147-156.
24. Nazari, S. Rapid Prototyping and Test of a C4ISR Ku-band Antenna Pointing and Stabilization System for Communications on-the-move [Text] / S. Nazari, K. Brittain, D. Haessig // IEEE Mil. Comm. Conf. (MILCOM 2005). – 2005. – Vol. 3. – P.P. 1528-1534.
25. An Antenna Tracking Method for Land-Mobile Satellite Communications System [Text] / [S.-I. Yamamoto, K. Tanaka, H. Wakana and S. Ohrnori] // Electron. Comm. Jpn. – Pt. I. – Vol. 78. – No 9. – 1995. – P.P. 91–102.
26. Gawronski, W. Antenna Control Systems: from PI to H ∞ [Text] / W. Gawronski // Anten. and Propag. Mag. – 2001. – Vol. 43. – No 1. – P.P. 52-60.
27. Palamar, M. Neurocontroller to Tracking Antenna Control of Information Reception from Earth Remote Sensing Satellites [Text] / M. Palamar // Intel. Data Acquis. and Adv. Comp. Syst/: Techn. and Appl. – 2005. – P.P. 340-344.
28. Lin, J.-M. Intelligent PD-type Fuzzy Controller Design for Mobile Satellite Antenna Tracking System with Parameter Variations Effect [Text] / J.-M. Lin, Po-K. Chang // IEEE Sym. on Comp. Intel. in Contr. and Autom. – 2011. – P.P. 1-5.
29. Chag, P.-K. Integrating traditional and fuzzy controllers for mobile satellite antenna tracking system design [Text] / Po-K. Chang, J.-M. Lin // Select. Pap. from: Comm. & Inf. Techn. 2008, Circ., Syst. and Sign. 2008, Appl. Math., Simul., Model. 2008. – Greece, 2008. – P.P. 102-108.

У статті описана методологія штучної ортогоналізації планів пасивного експерименту з експериментальними значеннями функції виходу в багатовимірному факторному просторі малої вибірки нечітких даних. Реалізація описаних процедур, що формують методологію, дозволяє отримувати адекватні математичні моделі та знаходити оптимальне за кінцевим станом управління складними технологічними процесами в умовах невизначеності

Ключові слова: штучна ортогоналізація, інформаційно-керуюча система, математична модель, оптимальне управління

В статье описана методология искусственной ортогонализации планов пассивного эксперимента по экспериментальным значениям функции выхода в многомерном факторном пространстве малой выборки нечетких данных. Реализация описанных процедур, формирующих методологию, позволяет получать адекватные математические модели и находить оптимальное по конечному состоянию управление сложными технологическими процессами в условиях неопределенности

Ключевые слова: искусственная ортогонализация, информационно-управляющая система, математическая модель, оптимальное управление

УДК 681.5:519.24

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ ОРТОГОНАЛИЗАЦИИ В ПОИСКЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Д. А. Дёмин

Доктор технических наук, профессор
Кафедра литейного производства
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002
E-mail: c7508990@gmail.com

1. Введение

Результаты многочисленных исследований эффективности систем управления технологическими процессами в промышленном производстве показывают, что их целесообразно совершенствовать путем учета критериев качества управления, связанных с необходимостью минимизации отклонений показателей ка-

чества продукции от регламентированных значений на всех возможных этапах конкретного технологического процесса. Речь, таким образом, может идти об оптимальном управлении по конечному состоянию, поиск которого неизбежно связан с построением адекватной математической модели управляемого процесса. Одним из примеров таких сложных технологических процессов является процесс плавки, характерными

особенностями которого являются необходимость учитывать большое количество параметров, изменяющихся в этом процессе, а также наличие неопределенности исходных данных. Последними являются параметры, описывающие состояние системы в реальном времени, и не подлежащие непосредственному измерению. Вследствие такой неопределенности, существует проблема оценивания состояний системы в технологическом процессе и построения адекватных моделей, которые могут быть использованы для решения этой проблемы. Существующие функциональные, численные или графические зависимости, связывающих входные и выходные параметры, на основе которых может быть осуществлено их адекватное описание, во многих случаях не позволяет моделировать управления плавкой. При таких условиях поиск оптимального управления процессами связан со значительными сложностями.

Путем решения названной проблемы является разработка методологии определения параметров моделей, описывающих технологические процессы, которая позволяет получать адекватное математическое описание связи выходных переменных - суть параметров качества продукции, с параметрами, характеризующими состояние системы в реальном времени. Наличие такой методологии обеспечивает возможность поиска оптимального по конечному состоянию управления и технической реализации информационно-управляющих систем в промышленном производстве. Это позволяет сделать вывод об актуальности исследований, посвященных проблеме моделирования и оптимизации управления технологическими системами промышленного производства в условиях неопределенности параметров, описывающих их состояние.

2. Анализ литературных данных и постановка задачи исследования

Для решения большого количества реальных производственных задач, связанных с моделированием и оптимизацией управления в условиях неопределенности, сегодня сформированы специальные научные дисциплины, среди которых можно выделить теорию нечетких множеств, теорию интервальной математики, теории свидетельств Демпстера-Шефера [1, 2] и теорию возможностей, математической основой которой является теория нечетких множеств. Для математической формализации неопределенностей возможно применение теории приближенных (грубых) множеств Павлака [3], позволяющей на основе итоговых экспертных оценок о состоянии системы и объективных или субъективных оценках ее параметров строить алгоритмы прогнозирования на основе процедур логического вывода [4]. В фундаментальной работе [4] отмечается также, что в приложениях могут быть успешно применены подходы на основе теорий приближенных и нечетких множеств [5]. Эффективными на практике оказываются методы моделирования, построенные на основе теории недоопределенных множеств [6 – 8], как элемент методологического обобщения существующих подходов к анализу и формализации неопределенностей. Основоположником же теории нечетких множеств в современной трактовке,

как отмечено в работе [4], является Л. А. Заде [9]. Фундаментальным трудом, позволяющим использовать аппарат нечеткой математики для решения проблем управления сложными объектами, является работа [10]. Математический аппарат теории нечетких множеств находит применение в разнообразных технических приложениях, примеры которых можно найти в работе [4]. Отмечено, что с его использованием решаются прикладные задачи управления технологическими процессами и сложными производственными системами. В частности, могут быть выделены задачи: анализа и управления энергетическими системами [11, 12], технологическими процессами и установками: химическими реакторами [13 – 15], процессами сварки [16, 17], системами вентиляции и кондиционирования [18, 19], процессами выращивания монокристаллов [20 – 22], нагревательными приборами [23], металлообрабатывающими станками [24], печами для плавки стекла [25], процессами бурения [26, 27], бойлерами [28]. Металлургические агрегаты и реализуемые в них процессы плавки также относятся к объектам, эффективное управление которыми возможно на основе реализации подходов теории нечетких множеств – это следует из ряда работ, посвященных исследованию возможностей управления процессами плавки в условиях неопределенностей [29 – 35].

Обобщение результатов описанных выше работ, посвященных вопросам нечеткого управления сложными производственными объектами и системами, предполагает необходимость разработки моделей в условиях неопределенностей, обусловленных невозможностью контроля многих параметров в реальном времени, невозможностью точного оценивания состояния системы, многофакторностью процесса и отсутствием достаточного объема информации для реализации управления. Все это, в свою очередь, позволяет считать, что задаче поиска оптимального управления в условиях неопределенности предшествует обязательно решение проблемы выбора структуры и оценивания параметров модели исследуемого процесса. Решение данной задачи может быть использовано в разработке информационно-управляющих систем для управления сложными технологическими процессами в промышленном производстве.

3. Цель исследования

Целью исследования является разработка методологии определения структуры и параметров моделей, описывающих технологические процессы в условиях неопределенности, которая позволяет находить оптимальное управление на всех основных этапах таких процессов.

4. Нечеткая кластеризация входных переменных

Математическая модель, описывающая взаимосвязь входных переменных сложного технологического процесса и выходных переменных, характеризующих качество готовой на выходе данного процесса продукции, может быть представлен в виде полинома Колмогорова-Габова [29 – 31]:

$$y_i = a_0 + a_1 F_1 + \dots + a_m F_m + a_{12} F_1 F_2 + \dots + a_{m-1,m} F_{m-1} F_m + \dots + a_{12\dots m} F_1 F_2 \dots F_m, \quad (1)$$

где F_i – нечёткие входные переменные, зависящие от некоторых измеряемых параметров x_i технологического процесса, y – выходная переменная, являющаяся результирующим параметром процесса, например параметром качества продукции.

Структурная схема системы управления, реализуемая с использованием модели (1), может быть представлена в виде, показанном на рис. 1.

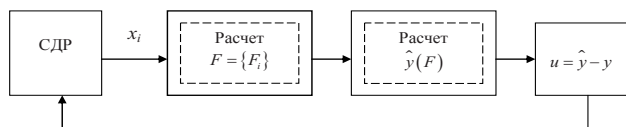


Рис. 1. Структурная схема системы управления

Проблемой на пути реализации такого подхода – использования уравнения регрессии вида (1) является большая сложность, связанная с его получением. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, выборка входных переменных F_i мала, причем под малостью выборки понимается явное несоответствие между числом экспериментов и количеством оцениваемых параметров уравнения. Во-вторых, имеет место неопределенность, связанная с неточностью условий проведения экспериментов, которые описаны нечетко по причине невозможности точного контроля параметров, описывающих сложный технологический процесс – собственно переменных F_i . Поэтому, в условиях существования вышеперечисленных проблем, необходима разработка методов оценки параметров уравнений регрессии (1). Реализация этой задачи в условиях нечетких входных переменных приводит к необходимости решения нескольких составляющих, первой из которых является кластеризация точек, соответствующих результатам экспериментов, координаты которых заданы нечетко. Процедура нечеткой кластеризации обоснована в работе [32] и может быть описана следующим образом.

Действительные значения координат F_{jp} – нечеткие числа с соответствующими функциями принадлежности типа:

$$\mu(F_{jp}) = \begin{cases} L\left(\frac{\bar{F}_{jp} - F_{jp}}{\alpha_{jp}}\right), & F_{jp} \leq \bar{F}_{jp}, \\ R\left(\frac{F_{jp} - \bar{F}_{jp}}{\beta_{jp}}\right), & F_{jp} > \bar{F}_{jp}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\mu(F_{jp})$ – функции принадлежности нечётких чисел F_{jp} , \bar{F}_{jp} – модальное значение нечеткого числа F_{jp} , $j = 1, 2, \dots, n$, $p = 1, 2, \dots, m$, α_{jp} , β_{jp} – левый и правый коэффициенты нечеткости в описании (2).

На основе совокупности модальных значений \bar{F}_{jp} , $j = 1, 2, \dots, n$, $p = 1, 2, \dots, m$, рассчитывается набор, задающий m – мерный гиперпараллелепипед, вершины которого являются центрами притяжения 2^m кластеров:

$$F_{p,\min} = \min_j \{\bar{F}_{jp}\}, p = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

$$F_{p,\max} = \max_j \{\bar{F}_{jp}\}, p = 1, 2, \dots, m.$$

Для каждой точки рассчитывается нечеткая расстояние до каждого из центров притяжения кластеров и соответствующая функция принадлежности. Далее полученные функции принадлежности используются для отыскания кластера, имеющего по отношению к рассматриваемой точке высшую степень предпочтения. Формально процедура реализуется следующим образом. Для пары (p -й кластер, j -я точка) нечеткое значение квадрата расстояния от центра тяжести кластера до точки определяется выражением

$$\rho_{kj}^2 = \sum_{p=1}^m (a_{kp} - F_{jp})^2, \quad (4)$$

где $k = 1, 2, \dots, 2^m$ – мера нечеткого расстояния между k -й вершиной и j -й точкой.

При этом функция принадлежности нечеткого значения квадрата расстояния от k -го центра до j -й точки имеет вид:

$$\mu(F_{jp}) = \begin{cases} L\left(\frac{(\bar{\rho}_{kj}^2) - \rho_{kj}^2}{\alpha_{kj}}\right), \\ R\left(\frac{\rho_{kj}^2 - (\bar{\rho}_{kj}^2)}{\beta_{kj}}\right). \end{cases} \quad (5)$$

В результате реализации этой процедуры для каждой из точек получены функции принадлежности нечетких чисел, отражающих «расстояния» до центров соответствующих кластеров. Эти числа сравниваются между собой и определяется кластер, «ближайший» по отношению к рассматриваемой точке. Оценка степени предпочтения нечеткого числа z_k перед нечетким числом z_l осуществляется по формуле:

$$\eta(\mu(z_k), \mu(z_l)) = \sup_{z_k > z_l} \min\{\mu(z_k), \mu(z_l)\}, k, l \in \{1, 2, \dots, m\}. \quad (6)$$

Номер кластера k^* , к которому будет присоединена очередная точка, определяется соотношением:

$$k^* = \arg \min_k \min_l \{\mu^\alpha(\rho_{kl}^2)\}, k, l \in \{1, 2, \dots, m\}. \quad (7)$$

Соотношения (5 – 7) обеспечивают решение задачи нечеткой кластеризации.

5. Искусственная ортогонализация и её применение для оценивания параметров математической модели

Технология искусственной ортогонализации [33, 34] включает в себя реализацию трех последовательных процедур, опираясь на результаты нечеткой кластеризации экспериментальных точек:

- оценка параметров локальных уравнений регрессии, описывающих поведение функции отклика в каждой из подобластей факторного пространства экспериментов по нечетким исходным данным и расчет нечетких оценок значений функции отклика в ортогональных вершинах полного факторного эксперимента;

- решение нечеткой многоиндексной задачи назначения для формирования усеченного ортогонального плана;
- оценивание параметров полного уравнения регрессии, описывающего эксперимент в целом, по нечетким данным, и отсев малозначимых факторов и взаимодействий.

Суть технологии построения адекватных уравнений регрессии в условиях малой выборки нечетких данных заключается в следующем. Результирующий параметр y (критерий эффективности) зависит от m влияющих факторов F_1, F_2, \dots, F_m , причем такая зависимость имеет вид (1). По результатам измерений значений факторов F_1, F_2, \dots, F_m и определяющего параметра y в ряду с n опытов формируется матрица плана H и векторы A, Y , где искомый вектор A оценивается по методу наименьших квадратов (МНК).

$$A = (H^T H)^{-1} H^T Y. \tag{8}$$

Совокупность результатов измерений нечетких чисел образует пассивный эксперимент, при этом соответствующая матрица H не является ортогональной, что исключает возможность независимого оценивания влияния каждого из факторов и их взаимодействий в уравнении регрессии (1). Для отсева малозначимых факторов результаты измерений входных переменных преобразуются таким образом, чтобы объединяющая их матрица была бы ортогональной.

После операции нормирования в m -мерном факторном пространстве формируется гиперкуб с центром в начале координат и длиной ребер, равной двум, и все множество результатов пассивного эксперимента разбивается на 2^m подмножеств (E_1, E_2, \dots, E_N) по правилу

$$E_e = \left\{ j: \min_s (F_s^0 - F_j)^T (F_s^0 - F_j) = (F_e^0 - F_j)^T (F_e^0 - F_j) \right\}, \tag{9}$$

где $F_j = (F_{j1}, F_{j2}, \dots, F_{jm})$ – j -я точка в нормированном факторном пространстве, $j=1, 2, \dots, n$; F_s^0 – s -я вершина гиперкуба, $s=1, 2, \dots, N$.

Точки, которые попали в l -й гиперквадрант факторного пространства, примыкающего к вершине F_l^0 (их число равно n_l), используются для локального описания функции отклика в пределах l -го гиперквадранта с помощью уравнения регрессии:

$$y_l = b_{l0} + b_{l1}F_1 + b_{l2}F_2 + \dots + b_{lm}F_m, \tag{10}$$

параметры которого рассчитываются по формуле МНК:

$$B_l = (H_l^T H_l)^{-1} H_l^T Y_l, \tag{11}$$

$$H_l = \begin{pmatrix} 1 & F_{j_1} & F_{j_2} & \dots & F_{j_m} \\ 1 & F_{j_2} & F_{j_2} & \dots & F_{j_2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & F_{j_{n_l}1} & F_{j_{n_l}2} & \dots & F_{j_{n_l}m} \end{pmatrix}, \quad B_l = \begin{pmatrix} b_{e0} \\ b_{e1} \\ \dots \\ b_{em} \end{pmatrix}, \quad Y_l = \begin{pmatrix} y_{j_1} \\ y_{j_2} \\ \dots \\ y_{j_{n_l}} \end{pmatrix}. \tag{12}$$

После применения процедур (9 - 11) ко всем гиперквадрантам факторного пространства формиру-

ется кусочно-линейное описание функции отклика, составленный из гиперплоскости. Совокупность значений функции отклика в точках, соответствующих вершинам гиперкуба, образует план активного ортогонализованного полного факторного эксперимента (ОПФЕ), реализацией которого происходит оценка регрессионных коэффициентов с помощью МНК.

Если при обработке данных реальных экспериментов - результатов серийных промышленных плавков - возникает ситуация, когда число экспериментальных точек в разных гиперквадрантах пространства оказывается разным, или в некоторых из подобластей факторного пространства таких данных явно недостаточно, план эксперимента перестает быть полным и ортогональным.

Для решения этой проблемы разработана процедура построения репликаподобного симметричного относительно центра эксперимента ортогонального подплана, являющегося результатом решения многоиндексной задачи математического программирования и вторым этапом технологии построения адекватных уравнений регрессии.

Построение усеченного представительского ортогонального плана производится следующим образом. Совокупность факторов m разбивается на три подмножества $\{A, B, C\}$ по $p = \frac{m}{3}$ факторов в каждом:

$$A = \{F_1, F_2, \dots, F_p\},$$

$$B = \{F_{p+1}, F_{p+2}, \dots, F_{2p}\},$$

$$C = \{F_{2p+1}, F_{2p+2}, \dots, F_{3p}\}.$$

Здесь $F_1^A = F_1, F_1^B = F_{p+1}, F_1^C = F_{2p+1}, l=1, 2, \dots, p$.

Формируется ортогональный полный m -факторный план. Общее число экспериментов плана составляет 2^m , а количество экспериментов, соответствующих всем возможным комбинациям уровней факторов, входящих в любое из подмножеств, равна 2^p . Эти комбинации нумеруются для факторов $F_1^C, l=1, 2, \dots, p$, индексом i_1 , а для факторов подмножеств $F_1^B, l=1, 2, \dots, p$, и $F_1^A, l=1, 2, \dots, p$, соответственно индексами i_2 та i_3 . Тогда любой строке плана в соответствие ставится тройка $(i_1 i_2 i_3)$. Множество комбинаций индексов $\{i_1 i_2 i_3\}$ представляется в виде трехмерной решетки 2^p узлами по каждой из трех координат.

Если ввести параметр:

$$Z_{i_1 i_2 i_3} = \begin{cases} 1, & \text{если строка } (i_1, i_2, i_3) \text{ включена в эксперимент,} \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

то набор значений $\{Z_{i_1 i_2 i_3}\}$, $i_1=1, 2, \dots, 2^p, i_2=1, 2, \dots, 2^p, i_3=1, 2, \dots, 2^p$ однозначно определяет некоторый план эксперимента, который содержит число строк равно числу единиц в наборе.

Вводится следующая система уравнений с булевыми переменными:

$$\begin{aligned} \sum_{i_3=1}^{2^p} Z_{i_1 i_2 i_3} &= 1, \quad i_1 = 1, 2, \dots, 2^p, i_2 = 1, 2, \dots, 2^p, \\ \sum_{i_2=1}^{2^p} Z_{i_1 i_2 i_3} &= 1, \quad i_1 = 1, 2, \dots, 2^p, i_3 = 1, 2, \dots, 2^p, \\ \sum_{i_1=1}^{2^p} Z_{i_1 i_2 i_3} &= 1, \quad i_2 = 1, 2, \dots, 2^p, i_3 = 1, 2, \dots, 2^p. \end{aligned} \quad (13)$$

Решение системы уравнений (13) определяет симметричный ортогональный план эксперимента с числом строк, равным 2^{2p} . Критерий представительности плана, который определяет суммарную дисперсию эксперимента, задаваемую выбранным набором $\{Z_{i_1 i_2 i_3}\}$, имеет вид:

$$\Phi = \sum_{i_1}^{2^p} \sum_{i_2}^{2^p} \sum_{i_3}^{2^p} \sigma_{i_1 i_2 i_3}^2 Z_{i_1 i_2 i_3}, \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_{i_1 i_2 i_3}^2 &= \sigma_v^2 = D(b_{v0}) + D(b_{v1})(F_1^{(0)}(V))^2 + \\ &+ D(b_{v2})(F_2^{(0)}(V))^2 + \dots + D(b_{vm})(F_m^{(0)}(V))^2, \end{aligned}$$

$F_i^{(0)}(V)$ – значение i -го фактора в V -ой вершине гиперкуба, $D(b_{vi})$ – дисперсия ошибки оценивания i -го коэффициента V -го уравнения регрессии.

Оценка дисперсии имеет вид:

$$\begin{aligned} y_{i_1 i_2 i_3} &= y_v = b_{v0} + b_{v1} F_1^{(0)}(V) + \\ &+ b_{v2} F_2^{(0)}(V) + \dots + b_{vm} F_m^{(0)}(V). \end{aligned} \quad (15)$$

Предложенная технология позволяет получить усеченный ортогональный план эксперимента. Однако, задача значительно усложняется, если измеряемые значения функции отклика – нечеткие числа. Функция принадлежности такого нечеткого числа $y_j^{(0)}$ определяется выражением:

$$\mu(y_j^{(0)}) = \exp \left\{ - \frac{\left(y_j^{(0)} - \bar{y}_j^{(0)} \right)^2}{2\sigma_j^2} \right\}, \quad (16)$$

а параметры $\bar{y}_j^{(0)}$ и σ_j^2 оцениваются статистически.

Вектор оценок коэффициентов уравнения регрессии, описывающего функцию отклика в каждом гиперквадранте, имеет вид:

$$B_1 = (H_1^T H_1)^{-1} H_1^T Y_1 = R_1 Y_1 = \begin{pmatrix} \sum_{v=1}^{n_1} R_{0v}^{(1)} y_{jv} \\ \sum_{v=1}^{n_1} R_{1v}^{(1)} y_{jv} \\ \dots \\ \sum_{v=1}^{n_1} R_{mv}^{(1)} y_{jv} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

где H_1 , B_1 , Y_1 приведены в уравнении (12), а $R_{iv}^{(1)}$ – элемент матрицы $R_1 = (H_1^T H_1)^{-1} H_1$, $i = 0, 1, \dots, m$, $v = 1, 2, \dots, n_1$, y_{jv}

– значения функции отклика для j -й точки, которая попала в v -й гиперквадрант.

Функция принадлежности нечеткого числа b_{li} имеет вид:

$$\mu(b_{li}) = \exp \left\{ - \frac{(b_{li} - \bar{b}_{li})^2}{2\sigma_{li}^2} \right\}, \quad (18)$$

$$\bar{b}_{li} = \sum_{v=1}^{n_1} R_{iv}^{(1)} \bar{y}_{jv}, \quad \sigma_{li}^2 = \sum_{v=1}^{n_1} (R_{iv}^{(1)})^2 \sigma_{jv}^2. \quad (19)$$

Характеристики функции принадлежности значений функции отклика в ортогональных точках плана рассчитываются по формулам:

$$\bar{y}_1^{(0)} = \sum_{i=0}^m \bar{b}_{li} F_{li}^{(0)} = \sum_{i=0}^m \sum_{v=1}^{n_1} R_{iv}^{(1)} y_{jv} F_{li}^{(0)}, \quad (20)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=0}^m b_{li}^2 (F_{li}^{(0)})^2 = \sum_{i=0}^m \sigma_{li}^2 = \sum_{i=0}^m \sum_{v=1}^{n_1} (R_{iv}^{(1)})^2 \sigma_{jv}^2. \quad (21)$$

Уровень компактности плана в целом оценивается наименее компактным телом неопределенности для функций принадлежности значений функций отклика в точках, входящих в выбранный план, и значения критерия для k -го плана определяется соотношением:

$$D_k = \max_{l \in N_k} \sigma_l^2. \quad (22)$$

Таким образом, задача поиска усеченного репликоподобного представительского плана в условиях, когда результаты измерений – нечеткие числа, сведена к поиску набора z , минимизирующего (22) и удовлетворяющего (13).

Решение этой задачи достигается путем декомпозиции к $(n-1)$ двухиндексных задач назначения. Этот план обрабатывается стандартным путем с независимым оцениванием каждого коэффициента a_s строящегося уравнения регрессии. Параметры функций принадлежности нечетких значений этих коэффициентов рассчитываются через соответствующие параметры функций принадлежности нечетких значений функции отклика в ортогональных точках, включенных в план.

Технология отсева малозначимых факторов и взаимодействий заключается в следующем. Выбирается некоторое значение уровня принадлежности α , и решается уравнение:

$$\mu(a_s^{(\sigma)}) = \exp \left\{ - \frac{\left(a_s^{(\sigma)} - \bar{a}_s^{(\sigma)} \right)^2}{2D_s^{(\sigma)}} \right\} = \alpha, \quad s = 1, 2, \dots$$

и для каждого s определяется интервал:

$$\left[a_s^{(\sigma) \min}, a_s^{(\sigma) \max} \right] = \left[\bar{a}_s^{(\sigma)} - \left(2D_s^{(\sigma)} \ln \alpha \right)^{\frac{1}{2}}, \bar{a}_s^{(\sigma)} + \left(2D_s^{(\sigma)} \ln \alpha \right)^{\frac{1}{2}} \right].$$

Если полученный интервал не захватывает ноль, то со степенью уверенности не ниже α можно считать, что

s-е слагаемое уравнения регрессии значимо. Иначе с этой же степенью уверенности его можно из уравнения исключить.

6. Пример практической реализации технологии искусственной ортогонализации

Одним из наиболее сложных промышленных технологических процессов является процесс электроплавки стали или чугуна. Сложность управления им обусловлена наличием всех сформулированных выше проблем: многофакторностью, невозможностью измерения входных переменных, малостью выборки данных для построения адекватных математических моделей и т.д. Формированию процедуры поиска оптимального управления на всех этапах данного технологического процесса – этапе плавки и термовременной обработки – должно предшествовать представление объекта линейными дифференциальными уравнениями, описывающими поведение системы в реальном времени.

Связь параметров, описывающих процесс электроплавки, показана на рис. 2.

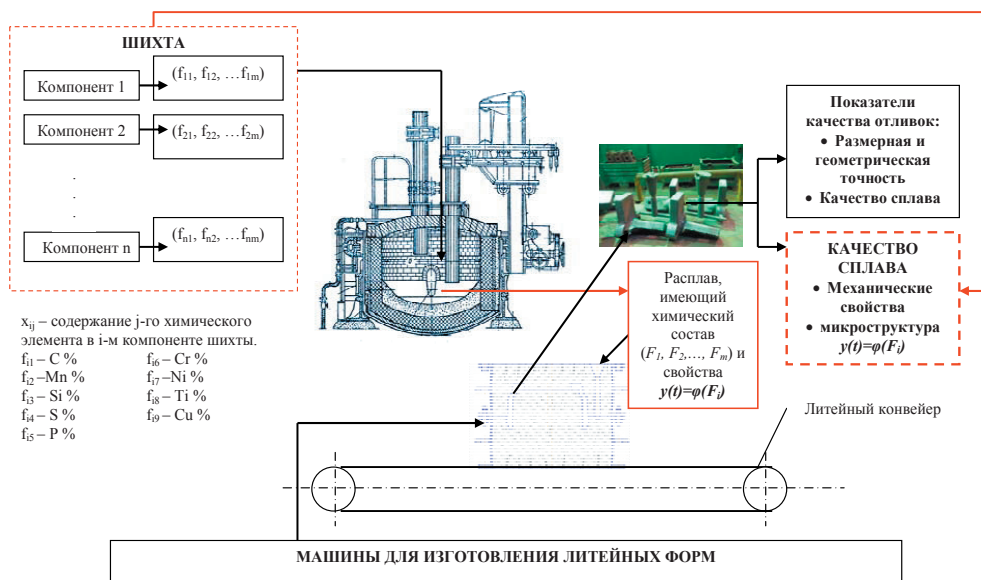


Рис. 2. Связь параметров, описывающих процесс электроплавки

На первом этапе система может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad t \in [t_0, T], \\ x(t_0) &= x_0, \quad x \in R_n, \quad u \in R_m, \end{aligned} \tag{23}$$

где A(t), B(t) – матрицы, имеющие кусочно-непрерывные ограниченные элементы,

x(t) – вектор состояния системы в момент времени t,

u(t) – вектор-функция управления в момент времени t,

R_n – заданное допустимое множество значений вектора состояния системы,

R_m – заданное допустимое множество значений вектор-функции управления.

Для реального объекта:

$$\dot{x}_1 = k_1 x_2, \quad \dot{x}_2 = k_2 x_3, \quad \dot{x}_3 = k_3 u, \tag{24}$$

где x₁ – температура ванны, T,

x₂ – сопротивление фазы, r,

x₃ – скорость движения электрода, v,

u – управление, давление в гидроцилиндре перемещения электрода,

k₁ – коэффициент пропорциональности, учитывающий силу тока и теплоемкость ванны,

k₂ – коэффициент пропорциональности между сопротивлением фазы и расстоянием от торца электрода до поверхности ванны,

k₃ – коэффициент пропорциональности между скоростью перемещения электрода и давлением в гидроцилиндре перемещения электрода.

Критерий качества управления при этом имеет вид:

$$J_0 = \frac{1}{2} e'(T) C_1 e(T), \tag{25}$$

где e(t) = z(t) - y(t) – величина рассогласования между фактическими значениями параметров вектор-функции выхода y(t) в процессе плавки и заданным эталонным значением вектор-функции выхода z(t).

Исследуемый объект имеет особенность – связь между параметрами, описывающими состояние системы (23), и параметрами вектор-функции выхода y(t) имеет сложную функциональную зависимость:

$$y(t) = f(F_i(t), x(t)), \tag{26}$$

где F_i(t) – содержание i-го элемента химического состава сплава в момент времени t, аналитическое описание которого представляет собой кинетическое уравнение по этому элементу.

В качестве измеряемого технологического параметра при этом выступает температура ванны (x₁=x₁ на рис. 1), оптимальное регулирование которой и позволяет управлять процессом на втором этапе плавки – этапе термовременной обработки [35].

Схема взаимосвязи между входными и выходными переменными в исследуемом процессе представлена на рис. 3.

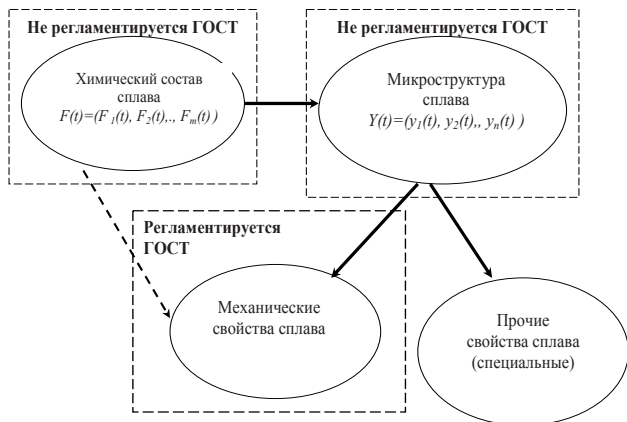


Рис. 3. Схема взаимосвязи между входными и выходными переменными в исследуемом процессе: $F_1(t)$ – содержание углерода, [C], %, $F_2(t)$ – содержание марганца, [Mn], %, $F_3(t)$ – содержание кремния, [Si], %, $F_4(t)$ – содержание серы, [S], %, $F_5(t)$ – содержание фосфора, [P], %, $F_6(t)$ – содержание хрома, [Cr], %, $F_7(t)$ – содержание никеля, [Ni], %, $F_8(t)$ – содержание титана, [Ti], %, $F_9(t)$ – содержание меди, [Cu], %

Реализация описанной технологии искусственной ортогонализации позволила получить адекватное математическое описание в виде регрессионного полинома вида (1) для четырёх выходных переменных – суть параметров микроструктуры чугуна, выплавляемого в чугунолитейном цехе ОАО «Кременчугский завод дорожных машин» (г. Кременчуг, Украина), и предназначенного для изготовления отливок автомобильной и дорожно-строительной техники. Выходными переменными были выбраны: размер графитовых включений на периферии отливки-образца (y_1), размер графитовых включений в осевой зоне отливки-образца (y_2), количество перлита на периферии отливки-образца (y_3) и количество перлита в осевой зоне отливки-образца (y_4). На основе анализа поверхностей отклика, описываемых четырьмя полученными математическими моделями, с помощью ридж-анализа [36], были установлены оптимальные интервалы значений нечёт-

ких входных переменных $[F_i^7 - \Delta_i, F_i^7 + \Delta_i]$, обеспечивающие выполнение регламентируемых требований по размерам графита (y_1 и y_2), и по количеству перлита (y_3 и y_4) в микроструктуре. Результаты приведены в табл. 1, 2.

Сравнение полученных результатов моделирования позволяет путём наложения интервалов $[F_i^7 - \Delta_i, F_i^7 + \Delta_i]$ для выходных переменных y_1 и y_2 , y_3 и y_4 определить значения интервалов, которые могут сформировать задание для управления процессом электроплавки.

Рассматривая электропечь как машину-автомат, интегрированную в цеховую формовочно-заливочную систему, возможна процедура логического синтеза системы управления плавкой. Последняя включает в себя наличие блока контроля логических условий, решающего задачу проверки выполнения условий $F_i(\tau) \in [F_i^7 - \Delta_i, F_i^7 + \Delta_i]$ и выдающего в случае его выполнения управляющие сигналы на исполнительные механизмы плавильно-заливочного комплекса. Реализация управления процессами термовременной обработки в виде алгоритма показана на рис. 4.

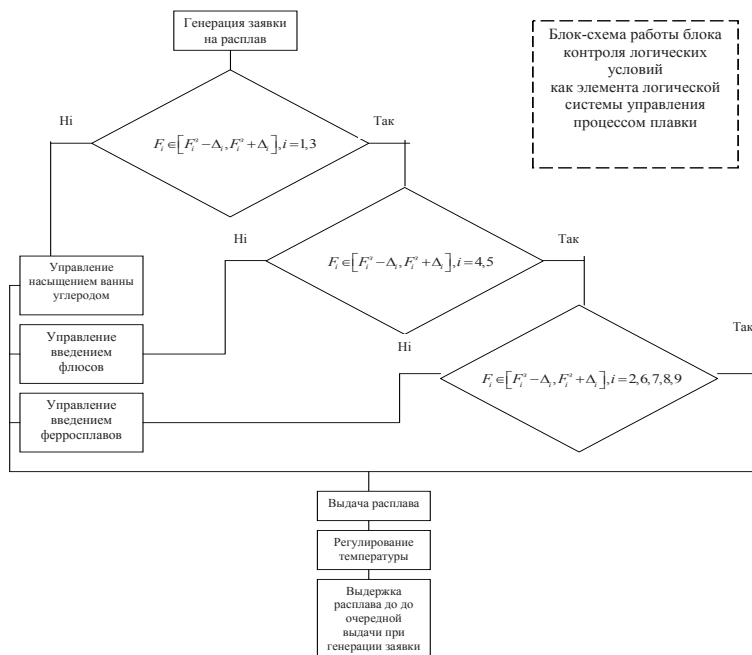


Рис. 4. Алгоритм оптимального управления процессом электроплавки

Таблица 1

Оптимальный интервал значений нечётких входных переменных $[F_i^7 - \Delta_i, F_i^7 + \Delta_i]$, обеспечивающий выполнение требований по выходным переменным y_1 и y_2

Допустимый диапазон	$F_i, \%$								
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9
min	3,415	0,619	2,383	0,1086	0,0567	0,1057	0,080	0,0238	0,0971
max	3,495	0,729	2,499	0,1181	0,0637	0,1406	0,195	0,031	0,1026

Таблица 2

Оптимальный интервал значений нечётких входных переменных $[F_i^7 - \Delta_i, F_i^7 + \Delta_i]$, обеспечивающий выполнение требований по выходным переменным y_3 и y_4

Допустимый диапазон	$F_i, \%$								
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9
min	3,25	0,61	2,15	0,095	0,063	0,12	0,080	0,024	0,09
max	3,48	0,84	2,51	0,112	0,082	0,24	0,18	0,033	0,12

Техническая реализация предложенного алгоритма оптимального управления позволяет решать задачи интеграции в функционирующие промышленные системы управления, совершенствуя их благодаря дополнению систем регулирования электрических режимов системами управления электроплавкой по конечному состоянию в условиях неопределенности параметров плавки.

7. Выводы

Предложенная технология искусственной ортогонализации может быть положена в основу построения математических моделей технологических процессов, используемых для поиска оптимального управления ими в условиях неопределенности. Теоретическим обоснованием этого могут быть следующие полученные результаты исследования.

1. Показано, что эффективным способом преодоления основной проблемы использования классических методов для нахождения оптимального

управления сложными технологическими процессами, обусловленной невозможностью измерения параметров, описывающих процесс, является построение уравнений регрессии, адекватно связывающих выходные переменные - суть параметры качества продукции, и входные переменные, являющиеся нечеткими числами, а также анализ описываемой ими поверхности отклика. Реализация этих процедур позволяет определять оптимальное управление процессом по конечному состоянию.

2. Теоретически и экспериментально доказано, что разработанная методология искусственной ортогонализации позволяет оптимальным образом оценивать параметры моделей, описывающих технологические процессы в условиях, когда входные переменные - суть нечеткие числа, а выборка данных для определения структуры и оценки параметров моделей мала, что позволяет строить адекватное аналитическое описание данных процессов по малой выборке данных, доступных для контроля в производственных условиях в режиме нормальной эксплуатации промышленного оборудования.

Литература

1. Dempster, A. P. Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping [Text] / A. P. Dempster // Ann. of Math. Statistics. – 1967. – V.38. – P. 325-339.
2. Shafer, G. A Mathematical Theory of Evidence. [Text] / G. Shafer. – Princeton: Princeton University Press, 1976. – 297 p.
3. Pawlak, Z. Rough relations [Text] / Z. Pawlak // Pr. IPI PAN. – 1981. – № 435. – P. 10.
4. Дилигенский, Н. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология [Текст] / Н. В. Дилигенский, Л. Г. Дымова, П. В. Севастьянов. – М.: Машиностроение-1. – 2004. – 397 с.
5. Bodjanova, S. Approximation of fuzzy concepts in decision making [Text] / S. Bodjanova // Fuzzy Sets and Systems. – 1997. – V.85. – P. 23-29.
6. Нариньяни, А. С. Недоопределенность в системе представления и обработки знаний [Текст] / А. С. Нариньяни // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1986. – № 5. – С. 8-11.
7. Нариньяни, А. С. Недоопределенные множества - новый тип данных для представления знаний [Текст] / А. С. Нариньяни. – Препринт ВЦ СО АН СССР: Новосибирск. – 1980. – № 232.
8. Нариньяни, А. С. Недоопределенное календарное планирование: новые возможности [Текст] / А. С. Нариньяни, Д. А. Иванов, С. В. Седреев, С. А. Фролов // Информационные технологии. – 1997. – № 1. – С. 34-37.
9. Zadeh, L. A. Fuzzy Sets [Text] / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – V.8. – P. 338-353.
10. Раскин, Л. Г. Нечеткая математика [Текст]: моногр. / Л. Г. Раскин, О. В. Серая. – Харьков: Парус, 2008. – 352 с.
11. Hiyama, T. Fuzzy logic control scheme for an-line stabilization of multi-machine power system [Text] / T. Hiyama, T. Sameshima // Fuzzy Sets and Systems. – 1991. – Vol. 39. – P. 181-194.
12. Лежнюк, П. Д. Застосування парето-оптимальності α -рівня для розв'язування задач енергетики з нечіткими параметрами [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко // Вісник КДПУ. – 2006. – № 4(39). – С. 144-146.
13. Hanakuma, Y. Ethylen plant distillation column button temperature control [Text] / Y. Hanakuma // Keisi. – 1989. – Vol. 32. – № 8. – P. 28-39.
14. Kolios, G. Regelung eines instationar betriebenen Festbettreaktors mit Fuzzy-Kontrollregeln [Text] / G. Kolios, Ph. Aichele, U. Nieken, G. Eingenberger // Proc. Int. Conf. 4. Dortmunder Fuzzy Tage. Dortmund, BRD. – 1994. – P. 429-436.
15. Roffel, B. Fuzzy control of a polymerization reactor [Text] / B. Roffel, P. F. Chin // Hydrocarbon Processing. – 1991. – № 6. – P. 47-50.
16. Murakani, S. Weld-line tracking control of arc welding robot using fuzzy logic controller [Text] / S. Murakani // Fuzzy Sets and Systems. – 1989. – Vol. 32. – P. 221-237.
17. Rehfeld, D. Schweissprozessanalyse und Qualitätssicherung mit Fuzzy-Logic [Text] / D. Rehfeld, Th. Schmitz // Proc. Int. Conf. 4. Dortmunder Fuzzy-Tage. Dortmund, BRD. – 1994. – P. 189-197.
18. Tobi, T. A practical application of fuzzy control for an airconditioning system [Text] / T. Tobi, T. Hanafusa // International Journal of Approximate Reasoning. – 1991. – № 5. – P. 331-348.

19. Watanabe, T. AI and fuzzy-based tunnel ventilation control system [Text] / T. Watanabe // Proc. Int. Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks. – Iizuka, Japan. – 1990. – P. 71-75.
20. Суздаль, В. С. Параметрическая идентификация Varmax моделей процесса кристаллизации крупногабаритных монокристаллов [Текст] / В. С. Суздаль, Ю. М. Епифанов, А. В. Соколов, И. И. Тавровский // Науковий вісник КУЕІТУ. – 2009. – № 4 (26). – С. 23-29.
21. Суздаль, В. С. Редукция модели при синтезе регуляторов для управления кристаллизацией [Текст] / В. С. Суздаль // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – №2/3(50). – С. 31-34.
22. Суздаль, В. С. Оптимизация задачи синтеза управления для процессов кристаллизации [Текст] / В. С. Суздаль // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – №6/3(54). – С. 41-44.
23. Heider, H. Energiesparen durch einen adaptiven Fuzzy-Regler fur Heizungsanlagen [Text] / H. Heider, V. Tryba // Proc. Conf. 4. Dortmunder Fuzzy-Tage. Dortmund, BRD. – 1994. – P. 282-288.
24. Hsieh, L. H. Fuzzy Sensordatenauswertung fur das automatisierte Entgraten [Text] / L. H. Hsieh, H. C. Groth // Proc. Conf. 4. Dortmunder Fuzzy-Tage. Dortmund, BRD. – 1994. – P. 173-180.
25. Hishida, N. Development of the operator support system applying fuzzy algorithms for glass tube molding equipment [Text] / N. Hishida // Proc. 2nd Int'l Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks. – Iizuka, Japan. – 1992. – P. 1097-1100.
26. Горбійчук, М. І. Спосіб відбору критеріїв оптимальності при адаптивному управлінні процесом буріння [Текст] / М. І. Горбійчук // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. – 1997. – Вип. 34 (5). – С. 18-23.
27. Горбійчук, М. І. Адаптивне управління процесом поглиблення свердловин [Текст] / М. І. Горбійчук // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. – 1998. – Вип. 35 (6). – С. 3-9.
28. Bien, Z. An automatic start-up and shutdown control of drum-type boiler using fuzzy logic [Text] / Z. Bien, D. H. Hwang, J. H. Lee, H. K. Ryu // Proc. 2nd Int'l Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks. – Iizuka, Japan. – 1992. – P. 465-468.
29. Демин, Д. А. Синтез систем управления технологическими процессами электродуговой плавки чугуна [Текст] / Д. А. Демин // Восточно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 2/10(56). – С. 4-9.
30. Серая, О. В. Оценивание параметров уравнения регрессии в условиях малой выборки [Текст] / О. В. Серая, Д. А. Демин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 6/4(42). – 2009. – С. 14-19.
31. Демин, Д. А. Метод обработки малой выборки нечетких результатов ортогонализованного пассивного эксперимента [Текст] / Д. А. Демин, Т. И. Каткова // Вісник Інженерної Академії. – Киев: Інженерна Академія України, 2010. – № 2. – С. 234-237.
32. Seraya, O. V. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data [Text] / O. V. Seraya, D. A. Demin // Journal of Automation and Information Sciences. – 2012. – № 44 (7). – pp. 34-48.
33. Раскин, Л. Г. Искусственная ортогонализация пассивного эксперимента в условиях малой выборки нечетких данных [Текст] / Л. Г. Раскин, Д. А. Демин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – № 1(80). – С. 20-23.
34. Серая, О. В. Оценка представительности усеченных ортогональных подпланов плана полного факторного эксперимента [Текст] / О. В. Серая, Д. А. Демин // Системні дослідження та інформаційні технології. – Київ: Інститут системних досліджень. – 2010. – № 3. – С. 84-88.
35. Demin, D. A. Synthesis of optimal temperature regulator of electroarc holding furnace bath [Text] / D. A. Demin // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2012. – № 6. – pp. 52-58.
36. Демин, Д. А. Оптимизация технологических режимов [Текст] / Д. А. Демин // Восточно-Європейський журнал передових технологій. – 2006. – №2/1(20). – С. 32-35.