

двигателя РД107 // Тр. XXIV / под ред. акад. РАН Б. И. Каторгина. М. : НПО Энергомаш, 2006.

2. Клюева О. Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты-носителя. Ч. 2. Цилиндрический теплообменник двигателя РД171 // Тр. XXIV / под ред. акад. РАН Б. И. Каторгина. М. : НПО Энергомаш, 2006.

3. Кишкин А. А., Краев М. В., Жуйков Д. А. Течение несжимаемой вязкой жидкости в зазоре конической щели между вращающимся диском и неподвижной стенкой // Известия вузов. 2002. № 3. С. 76–80. (Сер. Авиационная техника.)

4. Экспериментальные исследования течения несжимаемой жидкости вязкой жидкости в торцевой щели между вращающимся диском и неподвижной стенкой / Д. А. Жуйков, В. О. Фальков, А. А. Кишкин и др. // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 5 (45). С. 123–126.

5. Течение с теплоотдачей в полостях вращения энергетических установок космических и летательных аппаратов / А. А. Зуев, А. А. Кишкин, Д. А. Жуйков, М. И. Толстопятов // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 7 (40). С. 63–68.

6. Теплоотдача вращательных течений в турбомашинах на основе двухслойной модели турбулентного пограничного слоя / А. А. Зуев, А. А. Кишкин, М. И. Толстопятов, Д. А. Жуйков // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 5 (45). С. 127–129.

7. Прямолинейное равномерное течение газов с теплоотдачей в энергетических установках летательных аппаратов / М. И. Толстопятов, А. А. Зуев, А. А. Кишкин и др. // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 4 (44). С. 134–138.

8. Теплотехнический справочник / под ред. В. Н. Юренина, П. Д. Лебедева. М. : Энергия, 1976. Т. 2.

References

1. Gromyko M. B., Klyueva O. G. *Trudy XXIV*. Moscow, NPO Energomash, 2006, pp. 246–255.

2. Klyueva O. G. *Trudy XXIV*. Moscow, NPO Energomash, 2006, pp. 256–271.

3. Kishkin A. A., Kraev M. V., Zhuikov D. A. *Izvestiya vuzov, seriya Aviacionnaya tehnika*. 2002, № 3, pp. 76–80.

4. Zhuikov D. A., Falkov V. O., Kishkin A. A., Zuev A. A., Nazarov V. P. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 5(45), pp. 123–126.

5. A.A. Zuev, A.A. Kishkin, D.A. Zhuikov, M.I. Tolstopyatov. *Vestnik SibGAU* 2011, № 7 (40), pp 63–66

6. Zuev A. A., Kishkin A. A., Tolstopyatov M. I., Zhuikov D. A. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 5 (45), pp. 127–129.

7. Tolstopyatov M. I., Zuev A. A., Kishkin A. A., Zhuikov D. A., Nazarov V. P. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 4 (44), pp. 134–138.

8. *Teplotekhnicheskij spravochnik* (Heat Engineering handbook). Moscow, Energy, 1976, Vol. 2, 896 p.

© Зуев А. А., Толстопятов М. И., Жуйков Д. А., 2013

УДК 004.896(06)

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ В ПЕЧАХ ВАНИЮКОВА

Е. В. Костин

Норильский индустриальный институт
Россия, 663310, Норильск, ул. 50 лет Октября, 7. E-mail: kostinev87@gmail.com

Представлен подход построения алгоритмического обеспечения сложной технологической системы на примере процесса плавки в печах Ванюкова. Предложен способ управления качеством конечных продуктов посредством комбинированного использования нейросетевых моделей процесса и модификации алгоритма динамического программирования Беллмана.

Ключевые слова: печь Ванюкова, самоорганизующаяся сеть Кохонена, нейросетевая модель, динамическое программирование Беллмана.

ALGORITHMIC SUPPORT OF PRODUCTS QUALITY CONTROL IN MELTING FURNACES OF VANUKOV

E. V. Kostin

Norilsk Industrial Institute
7 50 years of October st., Norilsk, 663310, Russia. E-mail: kostinev87@gmail.com

This paper presents an approach to the construction of algorithmic support of complex technological systems on the example of the melting furnaces of Vanukov. The author offers a method for controlling the quality of final products through the combined use of neural network models of the process and modification of the dynamic programming algorithm of Bellman.

Keywords: furnace of Vanukov, Kohonen self-organizing network, neural network model, dynamic programming Bellman.

В настоящее время широко распространена задача разработки алгоритмического обеспечения управления сложными технологическими системами (СТС). Современный подход чаще всего использует мульти-модельности на всех стадиях: предварительной обработки методами фильтрации и сглаживания, моделирования путем создания искусственных нейронных сетей и управления с применением методов нечетких множеств [1].

Пирометаллургические процессы справедливо относят к СТС, поскольку они обладают всеми их качествами: существенной неопределенностью, многопараметричностью, сложными взаимосвязями между отдельными переменными и т. д. [2].

Процесс Ванюкова, реализуемый в печи Ванюкова на Медном заводе «ГМК «Норильский никель», предназначен для переработки сульфидного медно-никелевого сырья и получения штейнов с высоким 55–60 % содержанием меди [3]. Однако в условиях существенной неопределенности информации решить поставленную задачу оператор может не всегда [2]. Поэтому задачу управления процессом Ванюкова решают с помощью автоматизации, предполагающей использование различного алгоритмического обеспечения.

В настоящей работе описана методика разработки нейросетевой модели процесса Ванюкова и синтеза системы управления, основанной на модификации алгоритма динамического программирования и принципе оптимальности Беллмана [4].

Нейросетевое моделирование процесса Ванюкова.

В момент времени t процесс Ванюкова характеризуется множеством контролируемых $\mathbf{M}(t) = \{a_1(t), \dots, a_n(t), b_1(t), \dots, b_m(t)\}$, и неконтролируемых $\mathbf{Z}(t) = \{z_1(t), z_2(t), \dots, z_r(t)\}$ факторов, где $a_i(t), b_j(t), i = 1 \dots n$ – входные и $j = 1 \dots m$ – выходные значения соответственно. Объединив множества $\mathbf{M}(t)$ по вектору времени $\mathbf{T} = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ с дискретностью 120 мин (взятие проб штейна на химанализ), получим матрицу исторических данных \mathbf{D}_M размера $(n+m) \times k$. Количество

временных отсчетов k выбирается не более месяца, поскольку с течением времени может изменяться вид и состав перерабатываемого сырья.

Аппроксимация исторических данных осуществляется посредством самоорганизующейся нейронной сети Кохонена [5; 6]. Она относится к классу самонастраивающихся искусственных нейронных сетей для решения задачи классификации и разделения исходных данных на группы (классы) по мере их близости друг к другу. Структурная схема модели управления процессом представлена на рис. 1.

Процесс настройки нейронной сети Кохонена включает следующие этапы [5; 6]:

1. Из матрицы исторических данных \mathbf{D}_M последовательно выбирается множество входных и выходных факторов $\mathbf{M}(t_1), \mathbf{M}(t_2), \dots, \mathbf{M}(t_k)$.

2. Для настройки сети входной вектор должен быть безразмерным, поэтому выбранное множество подвергается нормализации, которая осуществляется путем наложения на шкалу [0, 1] по выражению

$$x_i = \frac{a_i - a_i^{\min}}{a_i^{\max} - a_i^{\min}},$$

где x_i – i -й фактор из множества нормализованных входных и выходных параметров $\mathbf{X}(t) = \{x_1(t), \dots, x_n(t), y_1(t), \dots, y_m(t)\}$.

3. Для каждого нейрона сети Кохонена рассчитывается Евклидово расстояние [5] между входными факторами и соответствующими весовыми коэффициентами нейрона:

$$d_j(\mathbf{X}(t)) = \sum_{i=1}^n (x_i(t) - w_{i,j})^2,$$

где j – номер нейрона сети Кохонена, $w_{i,j}$ – весовой коэффициент между i -м входным фактором и j -м нейроном.

4. Нейрон, обладающий минимальным Евклидовым расстоянием, помечается как нейрон «победитель».

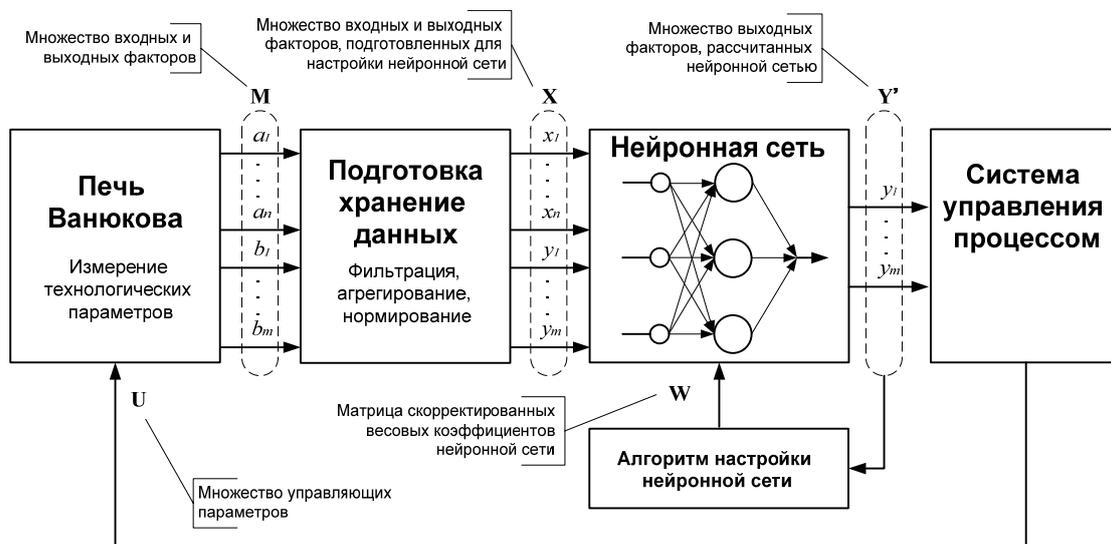


Рис. 1. Структурная схема модели управления процессом Ванюкова

5. Корректируются весовые коэффициенты нейрона победителя и нейронов, находящихся в его окрестности на плоскости сети Кохонена, по выражению:

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha(t) \cdot h(t) \cdot (x_i(t-1) - w_{ij}(t-1)),$$

где $w_{ij}(t-1)$ и $w_{ij}(t)$ – весовой коэффициент до и после корректировки; $\alpha(t)$ – коэффициент скорости обучения; $x_i(t-1)$ – i -й входной фактор в момент времени; $h(t)$ – функция окрестности нейрона победителя (функция Гаусса).

Процедура настройки сети Кохонена подразумевает проведение нескольких переборов всех экземпляров множества входных и выходных факторов (эпоха обучения). С наступлением новой эпохи увеличивается коэффициент скорости обучения.

В результате настройки сети Кохонена предложенным способом получают поверхности распределения входных и выходных факторов по весовым коэффициентам нейронов сети. Так, на рис. 2. представлено трехмерное распределение выходного фактора – содержание меди в штейне (ось z). По оси x отложены

координаты нейрона в структуре сети Кохонена, по оси y – значения весовых коэффициентов для входного фактора.

По рельефу распределения можно сделать выводы:

- переменная «медь в штейне» обладает несколькими экстремумами, что свидетельствует о сложности и нелинейности влияния управляющих воздействий, а также взаимосвязей между ними;

- сделав срез поверхности, например на уровне 56 %, как показано на рис. 3, вместо перебора в дальнейшем всех вариантов можно выделить заранее желаемые (затемненные) области изменения меди в штейне. Тогда достижение какой-либо одной из областей будет свидетельствовать о выборе траектории управления процессом на заданных значениях.

Оценку результата моделирования сетью Кохонена выходного фактора «Медь в штейне» проведем прямым сравнением с данными химанализов двухчасовых проб (рис. 4). Размещение основной тенденции по диагонали квадрата свидетельствует об отсутствии систематических ошибок, что очень важно в задачах аппроксимации.

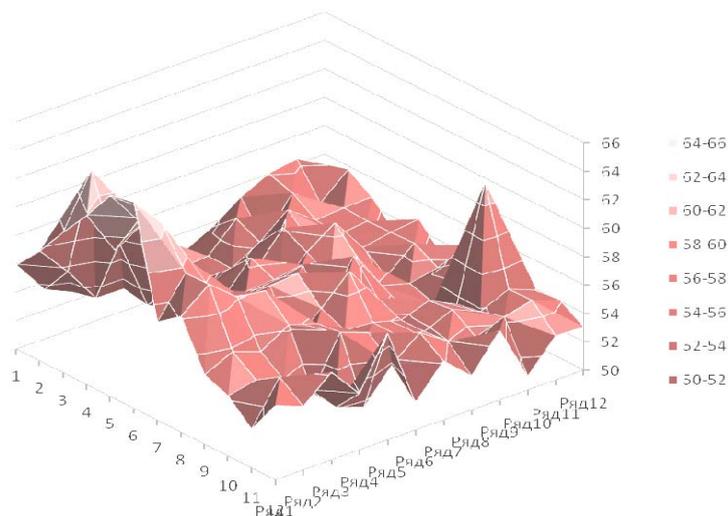


Рис. 2. Поверхность распределения «Медь в штейне»

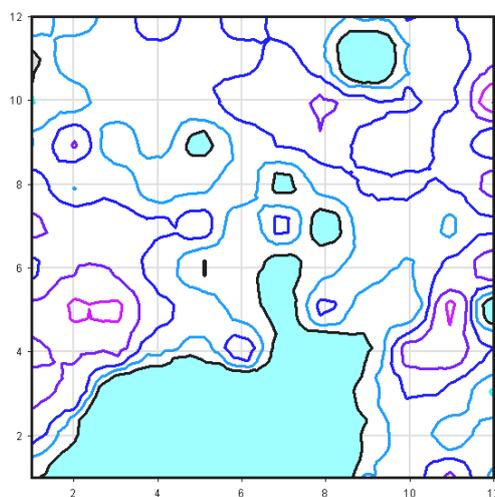


Рис. 3. Диаграмма распределения «Медь в штейне» по группам

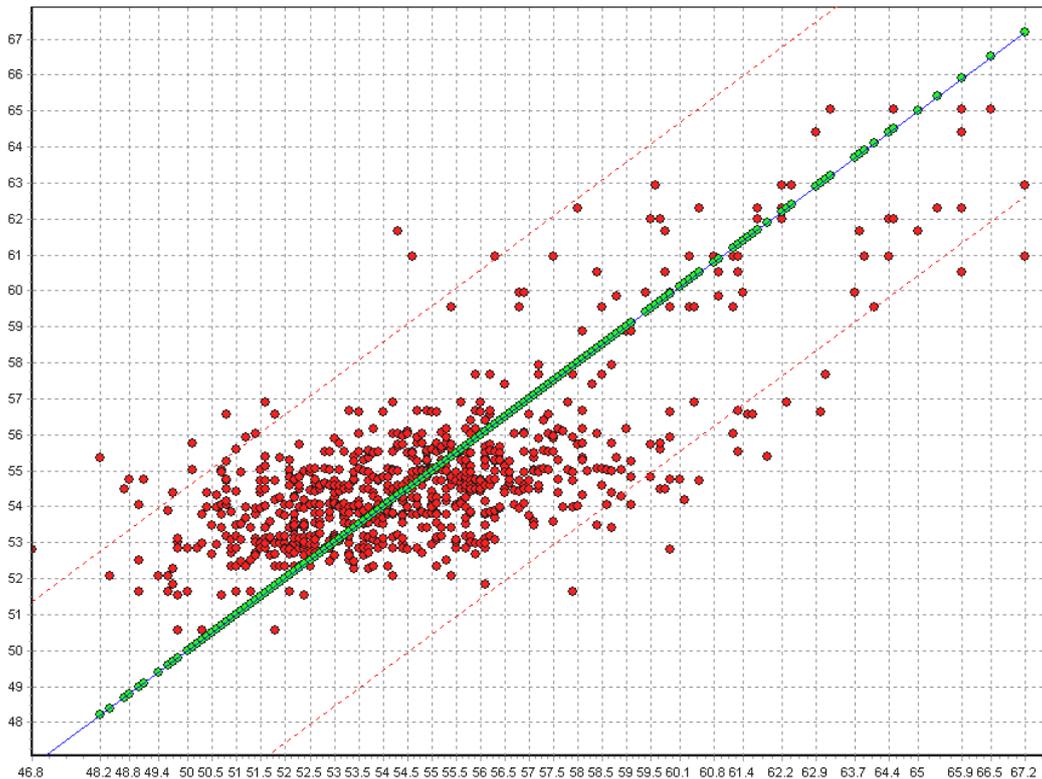


Рис. 4. Сравнение фактических (ось x) и расчетных по модели значений меди в штейне

Это говорит о хороших обобщающих способностях сети Кохонена, позволяющих выделить основную тенденцию изучаемого процесса. Применительно к процессу Ванюкова, прогнозирование результатов плавки позволяет синтезировать модель управления качеством конечных продуктов плавки.

Синтез модели управления сложной системой. Согласно регламенту производства, содержание меди в штейне должно быть на уровне 50–65 % при ограничении содержания ее в шлаке не более 0,72.

Тогда критерий управления качеством конечной продукции можно записать следующим выражением:

$$J = \int_0^T ((q_{шт} - d_{шт})^2 + (q_{шл})^2) dt \rightarrow \min ,$$

где $q_{шт}$ и $q_{шл}$ – текущее содержание меди в штейне и в шлаке соответственно; $d_{шт}$ – регламентированное значение меди в штейне.

Для решения задачи управления по заданному критерию необходимо построить функцию, определяющую управляющее воздействие. Как видно на рис. 3, функция управления имеет несколько областей решения (затемненных) поставленной задачи. Достижение заданного критерия необходимо осуществить наикратчайшим путем. Такую задачу решает метод динамического программирования и принцип оптимальности Беллмана [5].

Классический подход Беллмана предполагает разбиение процесса управления на дискретные моменты времени t . Для каждого момента времени принимается такое управляющее воздействие $U(t)$, которое обеспечивает кратчайший путь на весь

период управления T . Тогда критерий управления принимает следующий вид:

$$J = \sum_{i=1}^T [(q_{шт}(t_i, U(t_i)) - d_{шт})^2 + (q_{шл}(t_i, U(t_i)))^2] + F(\mathbf{M}(t_k)) \rightarrow \min ,$$

где $F(\mathbf{M}(t_k))$ – точность приведения в конечное состояние.

Введем понятие – «значение критерия» для момента времени t и управляющего воздействия $U(t)$. Оно характеризует отклонение процесса от регламентированного состояния:

$$S(t, U(t)) = (q_{шт}(t, U(t)) - d_{шт})^2 + (q_{шл}(t, U(t)))^2 .$$

Рекуррентное уравнение Беллмана вычисления вектора управления для каждого дискретного момента времени имеет вид

$$U(t_i) = \arg \min_{U(t_i) \in U} [S(t_i, U(t_i)) + J(t_{i+1})] ,$$

где $J(t_{i+1})$ – значение критерия на следующем шаге, которое определяется по выражению

$$J(t_i) = \min_{U(t_i) \in U} [S(t_i, U(t_i)) + J(t_{i+1})] .$$

Процедура вычисления наикратчайшего пути управления включает два этапа:

- «попятная» процедура вычисления всех возможных векторов управления, начиная с момента времени t_k ;
- «прямая» процедура вычисления наикратчайшего пути и соответствующих векторов управления, начиная с момента времени t_1 .

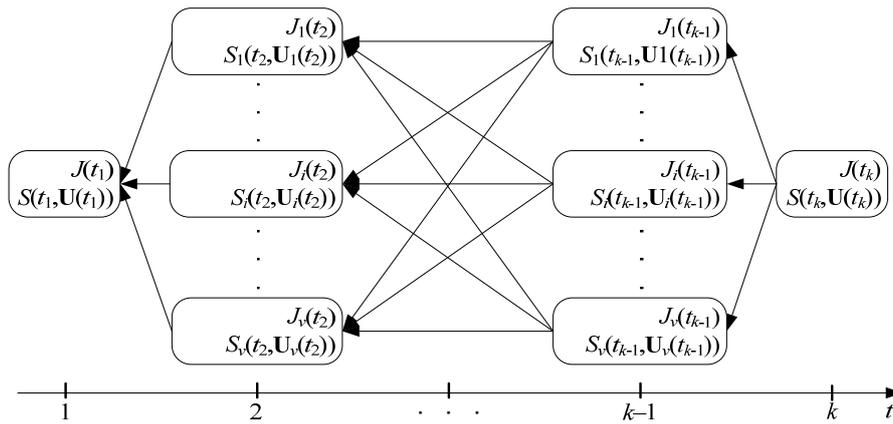


Рис. 5. Структурная схема расчета «попятной» процедуры

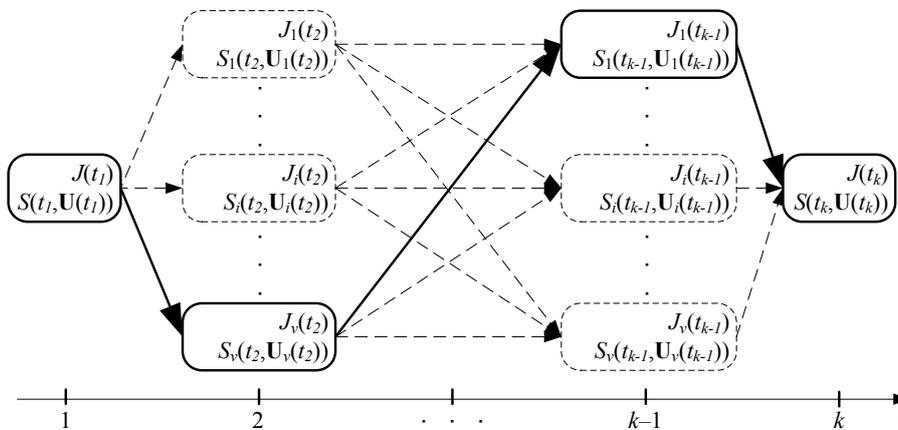


Рис. 6. Структурная схема расчета «прямой» процедуры

Структура расчета «попятной» процедуры показана на рис. 5. В момент времени t_k будем считать, что заданное состояние процесса находится в оптимальной точке $J(t_k) = F(\mathbf{M}(t_k))$. Исходя из конечного состояния, определяем все возможные векторы управляющих воздействий для момента времени t_{k-1} .

Пусть v – количество возможных вариантов управления на момент времени t . Тогда векторы возможных управлений, состояний и критериев качества обозначим нижним индексом i и рассчитаем $\mathbf{U}(t_{k-1})$, $S_i(t_{k-1}, \mathbf{U}(t_{k-1}))$, и $J_i(t_{k-1})$ для каждого варианта $i = 1..v$.

Таким образом, рассчитываются управляющие воздействия, состояния процесса и значения критерия оптимальности для каждого предшествующего момента времени до момента t_1 . В результате определяются все возможные пути проведения процесса.

Основываясь на результатах «попятной» процедуры, «прямой» расчет подразумевает процесс нахождения пути, обеспечивающего минимальное значение критерия управления на всем промежутке времени: $t = 1..k$, т. е. нахождение наикратчайшего пути (рис. 6). Наикратчайший путь отображается стрелками со сплошными линиями.

Процесс вычисления вектора управления по методу динамического программирования и принципа оптимальности Беллмана является относительно простой, но при этом очень трудоемкой процедурой, по-

этому целесообразно ввести модификации в «попятную» процедуру, позволяющую упростить и сократить количество вычислений.

Модификация первая. Зная области изменения выходных факторов (меди в штейне и шлаке), контуры которых отображены на рис. 3 (затемненные области), можно исключить состояния процесса, не попадающие в области содержания меди в штейне 56 %.

Модификация вторая. Количество расчетов можно целенаправленно уменьшить путем введения критерия группировки состояний процесса:

$$|S_n - S_m| \leq \delta, \quad n = 1..q, m = 1..v, n \neq m,$$

где δ – критерий точности группировки.

Если указанное условие выполняется, можно сказать, что разные управляющие воздействия (с индексами n и m) приведут к одному и тому же состоянию. Из этого следует, что можно выбрать всего одно из управляющих воздействий (например, с индексом n), и соответственно, уменьшить количество возможных вариантов управления v .

Пример расчета пути управления. В качестве примера расчета пути управления рассмотрим моделирование по начальным условиям процесса плавки в печи Ванюкова:

– содержание меди в штейне на предыдущем шаге $q_{шт} = 50,30 \%$;

- загрузка металлосодержащих компонентов шихты $U_1 = 111,40$ т/ч;
- расход флюсов на плавку $U_2 = 26,17$ т/ч;
- удельный расход кислорода на тонну металлосодержащих компонентов шихты $U_3 = 115,25$ м³/т.

Необходимо построить «траекторию движения» процесса к содержанию меди в штейне на уровне 56 %. Для этого смоделируем период плавки в 1 ч с дискретностью управления 15 мин. Шаг изменения управляющих воздействий примем равным 10 % от рабочего диапазона. В результате работы модифицированной «попятной» процедуры получаем 8 состояний на 1-м шаге, 11 состояний на 2-м шаге, 16 состояний на 3-м и 4-м шагах. При классическом методе с дискретным перебором управляющих воздействий на каждом шаге количество состояний составило бы 121.

Методом комбинаторики получаем варианты и значения критерия для каждого из возможных путей управления. При модифицированной «попятной» процедуре количество возможных оптимальных путей управления составляет $1 \times 8 \times 11 \times 16 \times 16 = 22\,528$. При классическом подходе количество путей управления составило бы $1 \times 121 \times 121 \times 121 \times 121 = 214\,358\,881$.

Полученные варианты сортируем по сумме критериев и определяем наикратчайший путь управления печью Ванюкова (рис. 7).

На рис. 7 видно, что изменение управляющих воздействий только на первых двух шагах расчета плана

управления стабильно повышает содержание меди в штейне до регламентированного уровня.

Предполагаемый план управления может изменяться на протяжении расчетного периода из-за возникновения возмущающих воздействий. Предложенная модификация метода динамического программирования Беллмана позволяет оперативно рассчитывать новый план, не затрачивая значительных вычислительных и временных ресурсов.

Таким образом, в результате проведенных исследований синтезирована система для оценки состояния сложной технологической системы на примере процесса Ванюкова. Она включает в себя алгоритм подготовки статистических данных, систему моделирования и модифицированный алгоритм Беллмана.

Разработанная имитационная модель позволяет на основе вектора входных факторов производить мониторинг процесса и определять его техническое состояние на заданном промежутке времени. При этом с увеличением времени прогноза естественно возрастает и ошибка прогнозируемых величин.

Синтезированная система обладает свойством универсальности, поскольку ее можно настроить для разных по своему назначению процессов, не лимитируя при этом количество входных и выходных факторов. Путем целенаправленного выбора необходимого критерия управления можно получать различные по своему назначению системы.

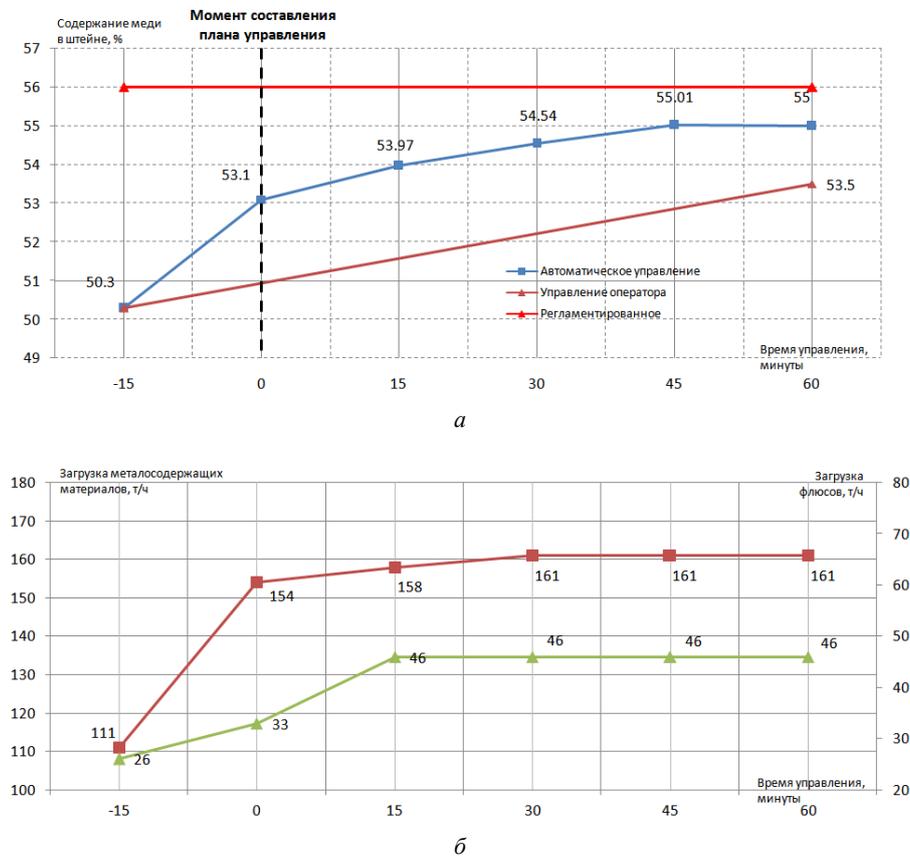


Рис. 7. Графики изменения содержания меди в штейне (а) и управляющих факторов (б)

Библиографические ссылки

1. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
2. Спесивцев А. В. Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004.
3. Плавка в жидкой ванне / А. В. Ванюков, В. П. Быстров, А. Д. Васкевич и др.; под ред. А. В. Ванюкова. М.: Metallurgia, 1988.
4. Костин Е. В., Писарев А. И. Подготовка статистических данных для построения нейросетевой модели процесса плавки в печах Ванюкова // Науч. вестник Норильского индустр. ин-та. 2011. № 9. С. 45–49.
5. Kohonen T. Self-Organizing Maps, Springer, 1995.
6. Вороновский Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. Харьков: Основа, 1997.

References

1. Okhtilev M., Sokolov B. V., Yusupov R. M. *Intellektualnyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamikoj slozhnykh tekhnicheskix obektov* (Intelligent technologies for monitoring and control of structural dynamics of complex technical objects). Moscow, Nauka, 2006, 410 p.
2. Spesivtsev A. V. *Metallurgicheskiy protsess kak ob'yekt izucheniya: novyye kontseptsii, sistemnost', praktika* (The steel making process as an object of study: new concepts, consistency, practice). SPb., Izd-vo Politekh. un-ta, 2004, 306 p.
3. Vanyukov A. V., Bystrov V. P., Vaskevich A. D. et al. *Plavka v zhidkoy vanne* (Melting in a liquid bath). Moscow, Metallurgy, 1988.
4. Kostin E. V., Pisarev A. I. *Nauchnyy vestnik noril'skogo industrial'nogo instituta*. 2011, № 9, pp. 45–49.
5. Kohonen T. *Self-Organizing Maps*, Springer, 1995.
6. Voronovskiy G. K. *Geneticheskiye algoritmy, iskusstvennyye neyronnyye seti i problemy virtual'noy real'nosti* (Genetic algorithms, neural networks, artificial and virtual reality problems). Khar'kov, Osnova, 1997, 112 p.

© Костин Е. В., 2013

УДК 548.571

ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Ю. Ю. Логинов¹, А. В. Можжерин¹, А. В. Брильков²¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: loginov@sibsau.ru²Сибирский федеральный университет Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: abrilkov@sfu-kras.ru

Методом просвечивающей электронной микроскопии исследованы закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках CdTe, HgTe, ZnTe, ZnSe, ZnS, Si и GaAs. Установлено, что при одних и тех же условиях обработки в полупроводниках группы A₂B₆ образуются дефекты наибольших размеров и с более высокой плотностью по сравнению с Si и GaAs. При этом степень нарушений кристаллической решетки и интенсивность дефектообразования убывает в следующей последовательности: от ZnS → ZnSe ≈ CdS → CdTe ≈ HgTe → ZnTe → GaAs ≈ Si. Экспериментальные результаты объясняются на основе анализа упругих напряжений, создаваемых в материале в результате образования структурных дефектов.

Ключевые слова: структурные дефекты, упругие постоянные, электронная микроскопия, полупроводники.

EFFECT OF ELASTIC STRESSES ON THE FORMATION OF STRUCTURAL DEFECTS IN SEMICONDUCTORS

Yu. Yu. Loginov¹, A. V. Mozsherin¹, A. V. Brilikov²¹Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev 31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: loginov@sibsau.ru²Siberian Federal University 79 Svobodnyi prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: abrilkov@sfu-kras.ru

The structural defects formation in semiconductors CdTe, HgTe, ZnTe, ZnSe, ZnS, Si and GaAs were investigated by method of transmission electron microscopy. It is found that the same processing conditions in semiconductors A₂B₆ defects are formed with largest dimensions and higher density as compared with Si and GaAs. The degree of crystal lattice irregularities and defect formation intensity decreases in the following order of ZnS → ZnSe ≈ CdS → CdTe ≈ HgTe → ZnTe to GaAs and Si. The experimental results are explained on the basis of analysis of the elastic stresses in the material generated as a result of the formation of structural defects.

Keywords: structural defects, the elastic constants, electron microscopy, semiconductors.