УДК 62.505

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АДЕКВАТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Ю.Л. Меньшиков
Днепропетровский национальный университет им.О. Гончара
Украина, 49010, Днепропетровск, проспект Гагарина, 72
E-mail: Menshikov2003@list.ru

Д.Н. Тогобицкая
Институт черной металлургии
Украина, 49050, Днепропетровск, площадь Стародубова, 1а
E-mail: dntog@mail.ru

Ключевые слова: алгебраические математические модели, адекватные модели, идентификация параметров, регуляризация, модель процесса выплавки стали.

Рассмотрены вопросы построения адекватных алгебраических математических моделей физических процессов. Определены свойства реальных процессов, для которых можно построить алгебраические математические модели. Дано определение адекватных математических моделей в алгебраической форме и сформулированы некоторые их свойства. Далее предложен алгоритм идентификации параметров указанных моделей. Для получения устойчивых результатов идентификации используется метод регуляризации А.Н. Тихонова. Рассмотрены различные варианты постановки таких задач. В качестве примера рассмотрена задача идентификации параметров физического процесса выплавки стали. Даны методические рекомендации.

IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF ADEQUATE LINEAR ALGEBRAIC MATHEMATICAL MODELS

Yu.L. Menshikov
Dnepropetrovsk National University named after O. Gonchar
Ukraine, 49010, Dnepropetrovsk, Gagarina Prospect, 72
E-mail: Menshikov2003@list.ru

D.N. Togobitskaya
Institute of the Iron and Steel Industry
Ukraine, 49050, Dnepropetrovsk, Starodubova Square, 1a
E-mail: dntog@mail.ru

Key words: algebraic mathematical models, adequate models, parameter identification, regularization, model of the process of steel melting.

Issues of constructing adequate algebraic mathematical models of physical processes are considered. Properties of real processes are determined, for which one may construct algebraic mathematical models. A definition of adequate mathematical models is given in algebraic form and some their properties are formulated. Again, an algorithm of parameter identification of the models is presented. To obtain stable identification results, the A.N. Tikhonov's regularization method is used. Different variants of the statement of such problems are considered. As an example, a parameter identification problem of the physical process of steel melting is considered. Methodical recommendations are given.

1. Введение

Математическое моделирование физических процессов является важным инструментом исследования окружающего мира.

Математические модели физических процессов могут быть заданы в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений или системы уравнений в частных производных, алгебраических соотношений, интегральных уравнений и т.д.

Во многих случаях математическая модель строится как алгебраические соотношения между характеристиками физического процесса. Такого типа модели получили значительное распространение в технике, экологии, экономики и т.д. [1,2]. Для обоснованного применения математических моделей указанного типа необходимо принимать во внимание, что они получены при определенных условиях. Рассмотрим эти условия более детально.

Пусть физический процесс в начальный момент времени $t = t_0$ характеризуется в общем случае бесконечным количеством переменных (характеристик) $q_1, q_2, ..., q_n, \ldots$. Далее эти переменные обрабатываются и преобразуются с течением времени по некоторому *Алгоритму* и получаем некоторые характеристики физического процесса $u_1, u_2, ..., u_k$ в момент времени $t = T$. Выбор характеристик физического процесса $u_1, u_2, ..., u_k$ определяются конечными целями исследований. Если *Алгоритм* преобразования со временем не изменяется, тогда можно получить связь между переменными $q_1, q_2, ..., q_n, \ldots$ и характеристиками $u_1, u_2, \ldots, u_k$. В общем случае эта связь является сложной нелинейной функцией безконечного множества переменных:

(1) $$\overline{\varphi}(q_1, q_2, .., q_n, ..) = (\varphi_1(q_1, q_2, .., q_n, ..), \ldots, \varphi_n(q_1, q_2, .., q_n, ..))^T = \overline{u} = (u_1, \ldots, u_k)^T,$$

где $(.)^T$ есть операция транспонирования.

Если только некоторые переменные процесса $q_1, q_2, ..., q_n$ изменяются с временем, а остальные практически не изменяются, или главное воздействие на показатели $u_1, u_2, ..., u_k$ оказывают только характеристики $q_1, q_2, ..., q_n$, тогда связь (1) преобразуется в следующую приближенную более простую зависимость

(2) $$\widetilde{\varphi}(q_1, q_2, .., q_n) = (\widetilde{\varphi}_1(q_1, q_2, .. q_n), \ldots, \widetilde{\varphi}_n(q_1, q_2, .. q_n))^T = \widetilde{u} = (\widetilde{u}_1, \ldots, \widetilde{u}_k)^T,$$

Если ограничиться только малыми изменениями характеристик $q_1, q_2, ..., q_n$ в малой окрестности D точки $(q_1^0, q_2^0, ..., q_m^0)$, тогда любую гладкую функцию $\widetilde{\varphi}_k(q_1, q_2, ..., q_n)$ в уравнении (2) можно *приближенно* заменить линейной зависимостью:

(3) $$A\overline{q} = \widetilde{u}, \; \overline{q} = (q_1, q_2, \ldots, q_n)^T,$$

где A есть матрица линейных математических моделей связи вектора $\overline{q}$ с вектором $\widetilde{u}$ размером $k \times n$.

Рассмотрим одну строку в (3):

(4) $$a_{k,1}\, q_1 + a_{k,2}\, q_2 + \ldots + a_{k,n}\, q_n = \widetilde{u}_k,$$

где $a_{k,1}, a_{k,2}, \ldots, a_{k,n}$ есть параметры приближенной математической модели связи показателей $q_1, q_2, ..., q_n$ физического процесса с показателем $\tilde{u}_k$.

Так как физический процесс, согласно предположению, является неизменным во времени, то параметры математической модели этого физического процесса будут постоянными. Будем в дальнейшем линейную математическую модель (3) называть локальной математической моделью в алгебраической форме в окрестности точки $(q_1^0, q_2^0, ..., q_n^0)$. Из процесса построения математической модели (3) можно сделать вывод, что не существует в принципе математической модели типа (3), которая бы точно описывала связь параметров реального физического процесса.

Пусть $\tilde{q} = (\tilde{q}_1, \tilde{q}_2, ..., \tilde{q}_n)^T$, есть экспериментальные измерения с максимальной ошибкой δ_0. Если при подстановке этих измерений $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2, ..., \tilde{q}_n$ в (3) получаем показатель $A\tilde{q}$, который отличается от измерения $\tilde{u}$ на величину δ и эта величина не превосходит ошибки δ_0 измерения показателя $\tilde{u}$, тогда математические модели (3) будем называть *адекватными математическими моделями* физического процесса в алгебраической форме. Если выполняется неравенство $\delta_0 > \delta$ для показателя $\tilde{u}_k$, тогда математическую модель (4) будем называть условно-адекватной с ошибкой δ по показателю $\tilde{u}_k$.

Исходя из условий построения приближенной математической модели физического процесса в алгебраическом виде, можно сформулировать следующие ограничения на исследуемые физические процессы:

1) *Алгоритм* преобразования переменных $\bar{q} = (q_1, q_2, ..., q_n)^T$ физического процесса к показателю $\tilde{u}$ не изменяется во времени (*стабильный во времени*);
2) Изменение характеристик $\bar{q} = (q_1, q_2, ..., q_n)^T$ происходит в некоторой малой ограниченной области $D \subset R^n$;
3) Влияние характеристик $q_{n+1}, q_{n+2}, ...$ на показатель $\tilde{u}$ является незначительным или эти характеристики не изменяются в процессе исследования физического процесса.

Из вышеизложенного вытекают свойства локальной линейной приближенной математической модели физического процесса в алгебраическом виде:

1) Математические модели типа (3) при любом выборе параметров $a_{k,1}, a_{k,2}, ..., a_{k,n}$ являются приближенными;
2) Математические модели типа (3) хорошо описывают реальный физический процесс лишь в некоторой достаточно малой окрестности изменения переменных $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2, ..., \tilde{q}_n$.

Следует потребовать также, чтобы результаты построения математической модели (параметров $a_{k,1}, a_{k,2}, ..., a_{k,n}$) были устойчивыми к малым изменениям исходных данных.

Кроме этого, желательно, чтобы количество исходных данных для расчетов параметров математической модели было минимальным.

С учетом постоянства *Алгоритма* преобразования переменных этот физический процесс можно называть *стабильным* в указанном выше смысле.

В процессе построения математической модели типа (4) можно использовать подход, который предложен в работах [3,4]. Однако при этом необходимо учитывать, что среди возможных матриц в системе (4) обязательно есть вырожденные. Кроме этого, в случае вырожденности матриц системы, правая часть системы (4) удовлетворяет условию существования решений.

В данной работе количество измерений характеристик процесса предполагается равным количеству этих переменных. Погрешность измерений предполагается заданной и имеет интервальный тип [5,6].

2. Постановка задачи идентификации параметров адекватных линейных математических моделей.

Рассматривается задача синтеза линейной математической модели статичного процесса с n переменными $q_1, q_2, \ldots, q_n$ относительно переменной q_1 с количеством измерений каждой переменной равной n в детерминированной постановке, как задача решения алгебраической системы [3, 4]:

$$A_p(q_2, q_3, \ldots, q_n)z = q_1 = u_1,$$

где оператор $A_p(q_2, q_3, \ldots, q_n)z$ определяется следующим образом:

$$A_p(q_2, q_3, \ldots, q_n)z = z_1 q_2 + z_2 q_3 + z_{n-1} q_n + z_n e,$$

e – единичный вектор размерности n, z – искомый вектор параметров математической модели процесса.

Поскольку измерения переменных $q_1, q_2, \ldots, q_n$ получены экспериментальным путем, то предполагается, что каждое измерение q_{ij}, $1 \le i, j \le n$ имеет некоторую погрешность, максимальная величина которой известна априори:

(6) $$\left| q_{ij} - q_{ij}^{ex} \right| \le \delta_i, \ 1 \le j \le n, i = 1,2, \ldots, n,$$

где q_{ij}^{ex} – точное измерение переменной q_{ij}.

Подобная информация об ошибках измерений определяется техническими характеристиками измерительных устройств. Статистические характеристики ошибок измерений неизвестны.

Обозначим через p вектор из пространства $R^n \oplus R^n \oplus R^n \oplus \ldots \oplus R^n = R^{n(n-1)}$:

$$p^T = (q_{21}, q_{22}, \ldots, q_{2n}, q_{31}, q_{32}, \ldots, q_{3n}, \ldots, q_{n1}, q_{n2}, \ldots, q_{nn}),$$

где R^n есть евклидовое векторное пространство размерности n, $(.)^T$ – знак транспонирования.

Каждый вектор q_i может принимать значение в замкнутой области $D_i \subset R^n$, согласно неравенствам (6). Вектор p может принимать значения в некоторой замкнутой области $D = D_2 \oplus D_3 \oplus D_4 \oplus \ldots \oplus D_n \subset R^{n(n-1)}$. Определенный оператор A_p соответствует каждому вектору *p* из области *D*. Класс операторов $\{A_p\} = K_A$ будет соответствовать множеству $D \subset R^{n(n-1)}$.

Представим (5) как

(7) $$A_p z = u_{\delta_1},$$

где $u_{\delta_1} = q_1$; $u_{\delta_1} \in U = R^n$; $z \in Z = R^n$; $\left\| u_{\delta_1} - u_1^{ex} \right\| \le \delta_1$, u_1^{ex} – точная правая часть уравнения (7); $\sup\limits_{p_\alpha, p_\beta \in D} \left\| A_{p_\alpha} - A_{p_\beta} \right\| \le h_1$; $\| . \|$ – норма в векторном евклидовом пространстве R^n.

Рассмотрим множество возможных решений уравнения (7) при фиксированном операторе $A_p \in K_A$:

$$Q_{\delta_1, p} = \{z : \left\| A_p z - u_{\delta_1} \right\| \le \delta_1\}.$$

Множество $Q_{\delta_1,p}$ ограничено, если $\Delta = \det A_p \ne 0$, и неограниченно, если $\Delta = \det A_p = 0$. Если учитывать погрешность измерений, то можно показать, что в множестве $\{A_p\} = K_A$ обязательно присутствует хотя бы один оператор, определитель матрицы которого равен нулю. Кроме того, по построению линейной математической модели следует, что в случае $\det A_p = 0$ правая часть удовлетворяет условию разрешимости.

Любой вектор из множества $Q_{\delta_1,p}$ представляет собой адекватную математическую модель процесса, так как после действия фиксированного оператора A_p вектор $A_p z$ совпадает с заданным вектором $q_1 = u_{\delta_1}$ с точностью δ_1 в каждой строке системы (7). Таких адекватных математических моделей существует бесконечно много.

Следует отметить, что широко используемый на практике метод наименьших квадратов для получения математических моделей в алгебраической форме, как правило, не требует выполнения условия адекватности модели в процессе их построения.

Для выбора индивидуальной математической модели из множества $Q_{\delta_1,p}$ необходимо использовать дополнительную информацию. Если такая информация отсутствуют, то возможно принимать за решение уравнения (7) элемент $z_p = Q_{\delta_1,p}$, для которого выполняется равенство [7]:

(8) $$\left\| z_p \right\|^2 = \inf_{z \in Q_{\delta_1, p}} \left\| z \right\|^2 .$$

Вектор $z_p = Q_{\delta_1,p}$ можно интерпретировать как максимально устойчивый элемент к малым изменениям факторов, которые не приняты во внимание (наиболее стабильная часть). Влияние указанных факторов будет только повышать норму вектора z_p [7]. Такое свойство решения z_p особенно важно при дальнейшем использовании этого решения, например, для построения достоверного краткосрочного прогноза.

Рассмотрим задачу идентификации параметров с учетом погрешности оператора задания A_p.

Введем в рассмотрение множество $Q^* = \bigcup\limits_{p \in D} Q_{\delta_1, p}$. В данном случае возможна постановка следующей экстремальной задачи (в условиях отсутствию дополнительной информации)

(9) $$\left\| z^* \right\|^2 = \inf_{p \in D} \inf_{z \in Q_{\delta_1, p}} \left\| z \right\|^2 .$$

Вектор $z^* \in Q^*$ является адекватной математической моделью процесса, которая имеет наименьшую норму среди всех возможных, если учесть погрешность оператора A_p.

Также возможна постановка следующей экстремальной задачи:

(10) $$\left\| z^*_{\sup} \right\|^2 = \sup_{p \in D} \inf_{z \in Q_{\delta_1, p}} \left\| z \right\|^2 .$$

Вектор $z^*_{\sup} \in Q^*$ имеет наибольшую норму среди решений задачи (8) на множествах $Q_{\delta_1,p}$.

Модели $z^*, z^*_{\sup}$ могут быть использованы для краткосрочного прогноза изменения показателя q_1 так как с одной стороны модели $z^*, z^*_{\sup}$ получены с использованием минимального количества измерений, а с другой стороны эти модели устойчивы к факторам, которые не были учтены.

Кроме задач идентификации параметров в постановках (9),(10) возможны и другие варианты постановок:

(11) $$\| z_{0,0,..,1} \|^2 = \inf_{q_2 \in D_2} \inf_{q_3 \in D_3} \ldots \inf_{q_{n-1} \in D_{n-1}} \sup_{q_n \in D_n} \inf_{z \in Q_{\delta_1, p}} \| z \|^2,$$

(12) $$\| z_{0,0,...,1,1} \|^2 = \inf_{q_2 \in D_2} \inf_{q_3 \in D_3} \ldots \sup_{q_{n-1} \in D_{n-1}} \sup_{q_n \in D_n} \inf_{z \in Q_{\delta_1, p}} \| z \|^2,$$

. . . .

(13) $$\| z_{0,1,...,1,1} \|^2 = \sup_{q_2 \in D_2} \ldots \sup_{q_{n-1} \in D_{n-1}} \sup_{q_n \in D_n} \inf_{z \in Q_{\delta_1, p}} \| z \|^2.$$

В некоторых случаях необходимы следующие постановки задач идентификации параметров:

(14) $$\| z^{0,0,...,0} \|^2 = \inf_{z \in Q_{\delta_1, p^{0,0,...,0}}} \| z \|^2,$$

(15) $$\| z^{0,0,...,1} \|^2 = \inf_{z \in Q_{\delta_1, p^{0,0,...,1}}} \| z \|^2,$$

. . . .

(16) $$\| z^{1,1,...,1} \|^2 = \inf_{z \in Q_{\delta_1, p^{1,1,...,1}}} \| z \|^2,$$

где вектор $p^{0,0,...,0}$ имеет минимально возможные значения всех компонент вектора $p \in D$, вектор $p^{0,0,...,1}$ имеет минимально возможные значения компонент $q_1, q_2, ..., q_{n-1}$ и максимально возможное значение q_n; . . . ; вектор $p^{1,1,...,1}$ имеет максимально возможные значения всех компонент вектора $p \in D$.

В ряде случаев возможна и такая постановка задачи идентификации параметров:

(17) $$\| A_{p^{opt}} z^{pl}_{\delta_1} - u_{\delta_1} \|^2 = \inf_{z_a \in Q^*} \sup_{A_p \in K_A} \| A_p z_a - u_{\delta_1} \|^2,$$

где z_a есть решение экстремальной задачи

(18) $$\| z_a \|^2 = \inf_{z \in Q_{\delta_1, a}} \| z \|^2.$$

В дальнейшем будем называть модель $z^{pl}_{\delta_1}$ наиболее правдоподобной математической моделью.

Использование этой модели для прогноза показателя q_1 позволяет получить прогноз с наименьшими отклонениями максимально возможных отклонений при заданной ошибке измерений переменных $q_2, q_3, ..., q_n$.

3. Метод решения и тестовые результаты

Для решения экстремальной задачи (8) использовался метод регуляризации А.Н. Тихонова [8]. Для этого экстремальная задача (8) заменяется на решение эквивалентной задачи минимизации сглаживающего функционала более удобной для применения численных методов [8]:

(19) $$M^{\alpha}[z, A_p, u_{\delta_1}] = \| A_p z - u_{\delta_1} \|^2 + \alpha \| z \|^2.$$

Уравнение Эйлера для функционала (19) имеет вид:

(20) $$A_p^* A_p z + \alpha z = A_p^* u_{\delta_1},$$

где A_p^* есть сопряженный оператор к оператору A_p.

Параметр регуляризации α определялся из уравнения невязки [8]:

$$\| A_p z_p - u_{\delta_1} \|^2 = \delta_1^2,$$

где z_p есть вектор на котором достигается минимум функционала (19) на множестве возможных $Q_{\delta_1, p}$ при фиксированном операторе A_p.

В качестве тестового примера выбрана задача построения линейной алгебраической математической модели процесса выплавки стали [9]. Этот процесс является стабильным и допускает описание с помощью линейной математической модели в малой окрестности выбранной точки области изменения переменных. Исходными данными для тестовых расчетов выбраны данные из работы [9] о химическом составе, параметрах термообработки и прочностных свойствах стали, которые представлены в таблице 1.

В таблице 1. были приняты следующие обозначения (для химического состава стали содержание элементов задано в массовых процентах): C (q_2) – количество углерода; Si (q_3) – количество кремния; Si (q_3) – количество кремния; Mn (q_4) – количество марганца; P (q_5) – количество фосфора; S (q_6) – количество серы ; Cr (q_7) – количество хрома; Mo (q_8) – количество молибдена; Ni (q_9) – количество никеля; Al (q_{10}) – количество алюминия; Cu (q_{11}) – количество меди; Ti (q_{12}) – количество титана; V (q_{13}) – количество ванадия; $T_{зак}$ (q_{14}) – температура закалки в ^{o}C; $\tau_{зак}$ (q_{15}) – время закалки в сек; Расход воды (q_{16}) – расход воды на охлаждение в м^3/час; $\sigma_в$ (q_1) – предел прочности стали в МПа.

Таблица 1. Исходные данные для тестовых расчетов.

N N	C (q_2)	Si (q_3)	Mn (q_4)	P (q_5)	S (q_6)	Cr (q_7)	Mo (q_8)	Ni (q_9)	Al (q_{10})
1.	0.53	0.67	0.69	0.005	0.006	0.17	0.0	0.05	0.024
2.	0.53	0.62	0.68	0.005	0.007	0.17	0.0	0.05	0.023
3.	0.53	0.69	0.69	0.006	0.006	0.17	0.0	0.05	0.025
4.	0.57	0.69	0.78	0.01	0.012	0.11	0.0	0.05	0.033
5.	0.57	1.27	0.78	0.009	0.013	0.11	0.0	0.05	0.032
6.	0.56	1.27	0.78	0.009	0.012	0.11	0.0	0.05	0.032
7.	0.59	1.26	0.75	0.01	0.011	0.11	0.0	0.05	0.034
8.	0.57	0.99	0.78	0.009	0.011	0.11	0.0	0.06	0.032
9.	0.55	1.1	0.78	0.008	0.011	0.11	0.0	0.06	0.031
10.	0.73	0.32	0.75	0.014	0.005	0.13	0.0	0.06	0.022
11.	0.73	0.32	0.75	0.014	0.005	0.13	0.0	0.06	0.022
12.	0.73	0.32	0.75	0.014	0.005	0.13	0.0	0.06	0.022
13.	0.73	0.32	0.75	0.014	0.005	0.13	0.0	0.06	0.022
14.	0.68	0.33	0.78	0.006	0.007	0.18	0.12	0.13	0.022

15.	0.68	0.33	0.78	0.006	0.007	0.18	0.12	0.13	0.022
16.	0.68	0.33	0.78	0.006	0.007	0.18	0.12	0.13	0.022
17.	0.53	0.64	0.69	0.006	0.006	0.17	0.0	0.06	0.023

Продолжение таблицы 1.

N N	Cu (q_{11})	Ti (q_{12})	V (q_{13})	$T_{зак}$ (q_{14})	$\tau_{зак}$ (q_{15})	Расход Воды (q_{16})	**$\sigma_в$** (q_1)
1.	0.08	0.006	0.018	920	180	80	989.8
2.	0.09	0.006	0.019	920	180	80	1009.4
3.	0.08	0.006	0.018	920	180	100	989.8
4.	0.06	0.008	0.088	900	180	70	1136.8
5.	0.07	0.008	0.087	900	180	70	1136.8
6.	0.06	0.008	0.088	900	220	76	1110.3
7.	0.07	0.008	0.086	900	220	76	1146.6
8.	0.06	0.007	0.089	900	180	70	1100.5
9.	0.07	0.007	0.088	900	220	76	1110.3
10.	0.08	0.006	0.0	815	140	80	1241.9
11.	0.08	0.006	0.0	815	160	80	1237.3
12.	0.08	0.006	0.0	815	180	80	1216.9
13.	0.08	0.006	0.0	815	80	80	1231.0
14.	0.09	0.006	0.009	815	180	76	1195.6
15.	0.09	0.006	0.009	815	180	60	1078.0
16.	0.09	0.006	0.009	815	180	103	1185.8
17.	0.10	0.007	0.019	920	180	100	989.9

Выполним построение линейной алгебраической математической модели связи предела прочности стали $\sigma_в$ (q_1) с характеристиками процесса выплавки стали ($q_2 - q_{16}$).

Матрица A размером 16×16 формировалась следующим образом**:** строками матрицы A являются строки Таблицы 1. со второй по семнадцатую без последних элементов, последний столбец матрицы A заполняется единицами.

Решение уравнения (20) выполнялось численными методами с выбором параметра регуляризации α из уравнения невязки.

В результате получена следующая линейная алгебраическая математическая модель процесса выплавки стали:

(21) $$q_1 = 690q_2 - 30.65q_3 - 420.4q_4 + 28.7q_5 + 4.4q_6 + 116.6q_7 - 53.9q_8 + 5.5q_9 + \\ + 10.5q_{10} + 4.9q_{11} + 3.92q_{12} - 11.04q_{13} - 0.121q_{14} + 0.33q_{15} + 1.42\,q_{16} + 313.9\,.$$

При этом параметр регуляризации α оказался равным 0.0462.

Для дополнительной проверки адекватности полученной математической модели в алгебраической форме на новом измерении был выполнен расчет показателя q_1 с использованием последней строки в таблице 1. (без последнего элемента). В результате расчетов был получен показатель q_1 равный 1061.7 МПа, который мало отличается от известного табличного значения 989.9 МПа (последний элемент в последней строке).

Следует заметить, что адекватность математической модели на будущие измерения, которые выходят из малой окрестности точки $(q_1^0, q_2^0, \ldots, q_n^0)$, определить невозможно. Однако, можно надеяться, что если условия при построении адекватной математической модели не изменяются в будущем, тогда можно полагать полученную математическую модель адекватной и для будущих измерений в той же самой малой окрестности изменения переменных.

Авторы полагают, что предложенный подход позволяет синтезировать и нелинейные математические модели путем последовательного перебора малых окрестностей, в которых строились линейные многомерные модели.

4. Заключение

В работе рассмотрен алгоритм идентификации параметров адекватной математической модели в алгебраической форме. Рассмотрены условия, при которых такие математические модели могут быть правомерны. Дано определение адекватного математической модели в алгебраической форме. Предложено несколько постановок задач идентификации в зависимости от конечных целей исследования. В качестве конкретного примера рассмотрена задача идентификации параметров алгебраической адекватной математической модели условно стабильного процесса выплавки стали. Полученные результаты можно использовать для анализа влияния физических параметров на физический процесс.

Список литературы

1. Kuchuk F.J, Onur M., Hollaender F. Pressure Transient Formation and Well Testing. Dev. in Petr. Science Vol. 57. Elsevier Science, 2010. 414 p.
2. Алексанян И.Ю., Максименко Ю.А., Феклунова Ю.С. Математическое моделирование тепломассопереноса при распылительной сушке растительных экстрактов // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. «Управление, вычисл. техн. информ.». 2013. № 1. С. 9-13.
3. Menshkov Yu.L. Identification of Mathematical Model Parameters of Stationary Process // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2014. Vol. 2, No. 5. P. 189-193.
4. Menshkov Yu.L. Features of Parameters Identification of Algebraic Mathematical Models // International Journal of Engineering and Innovative Technology. 2014. Vol. 4, No. 5. P. 251-255.
5. Меньшиков Ю.Л. Идентификация параметров математической модели при минимуме априорной информации // Труды IV Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '05. Москва 25-28 января 2005 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2005. С. 312-320.
6. Поляк Б.Т., Назин С.А. Оценивание параметров в линейных многомерных системах с интервальной неопределенностью // Проблемы управления и информатики. 2006. № 1-2. С. 38-49.
7. Меньшиков Ю.Л. Идентификация параметров при минимуме априорной информации // Автоматика 2006: Матеріали 13-ї Міжнар. Конференції з автоматичного управління. Винница, ВНТУ, 2006. С. 267-270.
8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 279 с.
9. Тогобицкая Д.Н.,Бабаченко А.И.Козачек А.С. Физико-химические критерии и модели для оценки влияния химического состава на свойства колесной стали // НауковІ ВІстІ. СучаснІ проблеми металургіi. 2013. № 16. ДнІпропетровськ: НМетау, 2014. 89 с.