

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 8 (101)

август

2009

Редакционный совет:

КУЗНЕЦОВ Н. А.
МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
ПЕШЕХОНОВ В. Г.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.

Главный редактор:
ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:
ПОДУРАЕВ Ю. В.
ПУТОВ В. В.
ЮЩЕНКО А. С.

Выпускающий редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:
ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БОГАЧЕВ Ю. П.
БУКОВ В. Н.
ВОСТРИКОВ А. С.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
ИВЧЕНКО В. Д.
ИЛЬЯСОВ Б. Г.
КАЛЯЕВ И. А.
КОЛОСОВ О. С.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
КУЗЬМИН Н. Н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
ЛЕОНОВ Г. А.
ЛЁВИН Б. А.
ЛОХИН В. М.
НОРЕНКОВ И. П.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
РАПОПОРТ Э. Я.
РАССАДКИН Ю. И.
РАЧКОВ М. Ю.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФУРСОВ В. А.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЛЫСЕНКО А. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Перепелкин Е. А.** Численный метод редукции задачи модального управления многомерными объектами 2
Кочемасов А. В., Володин В. В. Определение сингулярных решений краевых задач в динамических системах на основе процедуры разложения на ортогональные подпространства 7

АВТОМАТИЧЕСКОЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Ишметьев Е. Н., Усачев М. В., Михальченко Е. С., Наливкин А. К.** Синтез системы оптимального управления электрическим режимом сверхмощной дуговой сталеплавильной печи ДСП-180 11
Коростелев В. Ф., Хромова Л. П., Рассказчиков А. Н. Управление процессом кристаллизации сплава В95 18
Ануров Ю. М., Пушкарев А. Д., Купцов А. Б., Максютин М. М. Синергетическое управление турбогенератором с бесщеточной системой возбуждения 25
Сторублев М. Л. Определение показателей точности технологических процессов в ходе их выполнения на основе теории чувствительности 31
Косинский М. Ю., Шихин В. А. Исследование возможностей нечетких моделей для оценивания эксплуатационной надежности автоматизированных систем 35
Игнатьев С. А., Игнатьев А. А., Иващенко В. А. Автоматизированные системы мониторинга технического состояния технологического оборудования 43

МЕХАТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

- Князь В. А., Крыченков В. Ф., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Салтыков Е. Б.** Диагностика патологий зрения человека по антропометрическим данным лица методами технического зрения 48
Баусова З. И., Бодин О. Н., Востриков А. А. Использование моделирования периодики Венкебаха для оценки степени тренированности сердца 54
Сидорова М. А., Ерушова Н. А. Обоснование выбора параметров нейросетевой скрининговой диагностики нарушений системы гемостаза 59

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Девятисильный А. С., Числов К. А.** Модель гравинерциальной системы на подвижном основании 67
Заведеев А. И. Исследование точности астрономической системы управления ориентацией космического аппарата 70
Ивченко Н. К., Ивченко А. В. Аналитический подход к проблеме монтажных искажений быстровращающейся опоры гиросприбора 75
Contents 79

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

УДК 681.5

Е. А. Перепелкин, д-р техн. наук, проф.,
Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова
eap@list.ru

Численный метод редукции задачи модального управления многомерными объектами

Рассматривается характер зависимости характеристического многочлена матрицы замкнутой системы от коэффициентов обратной связи. Описывается алгоритм, позволяющий сократить число переменных и уравнений в задаче модального синтеза. Данный алгоритм применяется для решения задачи синтеза стабилизирующего управления боковым движением самолета.

Ключевые слова: обратная связь по выходу, модальный синтез, боковое движение самолета.

Постановка задачи

Объектом управления является многосвязная динамическая система, поведение которой описывается уравнениями

$$\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx, \quad (1)$$

где x — n -мерный вектор состояния; u — m -мерный вектор управления (вход системы); y — l -мерный вектор измерений (выход системы); A , B , C — постоянные матрицы соответствующих размеров. Задача модального синтеза заключается в построении обратной связи по выходу $u = Fu$ такой, что матрица замкнутой системы $\bar{A} = A + BFC$ обладает заданным набором собственных чисел или, что эквивалентно, характеристический многочлен матрицы \bar{A} совпадает с заданным многочленом.

Данная задача относится к классу трудно решаемых задач теории линейных систем управления [1]. Известно, что управляемость пары (A, B) и наблюдаемость пары (A, C) являются необходимыми условиями существования решения задачи о назначении собственных чисел матрицы \bar{A} . Известно также, что "почти для всех матриц" A , B , C таких, что пара (A, B) управляема, пара (A, C) наблюдаема и $ml > n$, задача модального синтеза имеет решение. Случай $ml = n$ является особым. Соответствующие результаты представлены в работе [2]. В то же время условия, которые одновременно являются необхо-

димыми и достаточными для существования решения задачи модального синтеза, неизвестны. Связано это с тем, что задача нахождения матрицы обратной связи является задачей решения системы нелинейных алгебраических уравнений, для которой в общем случае условия существования решения в аналитическом виде не записываются.

В данной статье рассматривается характер зависимости характеристического многочлена матрицы замкнутой системы от коэффициентов обратной связи. Описывается алгоритм, позволяющий сократить число переменных и уравнений в задаче модального синтеза. Данный алгоритм применяется для решения задачи синтеза стабилизирующего управления боковым движением самолета.

Алгоритм синтеза

Рассмотрим, как характеристический многочлен матрицы замкнутой системы зависит от коэффициентов обратной связи. Обозначим $a(\lambda)$ характеристический многочлен матрицы A , $\bar{a}(\lambda)$ — характеристический многочлен матрицы \bar{A} . Тогда

$$\begin{aligned} \bar{a}(\lambda) &= |\lambda E - A - BFC| = \\ &= a(\lambda)|E - FG(\lambda)| = a(\lambda)|E - G(\lambda)F|, \end{aligned}$$

где E — единичная матрица соответствующего размера; $G(\lambda) = C(\lambda E - A)^{-1}B$ — передаточная матрица системы (1).

Запишем матрицы F и G поэлементно:

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1} & \dots & f_{ml} \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} g_{11} & \dots & g_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{l1} & \dots & g_{lm} \end{bmatrix}.$$

В общем случае \bar{a} является многочленом от элементов F , причем степень \bar{a} по переменной f_{ij} равна 1. Например, при $m = l = 2$

$$\begin{aligned} \bar{a} &= a(1 - g_{11}f_{11} - g_{21}f_{12} - g_{12}f_{21} - g_{22}f_{22} + \\ &+ (g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21})(f_{11}f_{22} - f_{21}f_{12})). \end{aligned}$$

При $m = 2, l = 3$

$$\begin{aligned} \bar{a} &= a(1 - g_{11}f_{11} - g_{21}f_{12} - g_{31}f_{13} - g_{12}f_{21} - \\ &- g_{22}f_{22} - g_{32}f_{23} + (g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21})(f_{11}f_{22} - f_{21}f_{12}) + \\ &+ (g_{11}g_{32} - g_{12}g_{31})(f_{11}f_{23} - f_{13}f_{21}) + \\ &+ (g_{21}g_{23} - g_{22}g_{31})(f_{12}f_{23} - f_{13}f_{22})). \end{aligned}$$

Обозначим $L_i(A)$ сумму всех главных диагональных миноров матрицы A размера i . Тогда [3]

$$\begin{aligned} \bar{a} &= a \left(1 + \sum_{i=1}^m (-1)^i L_i(FG) \right) = \\ &= a \left(1 + \sum_{i=1}^l (-1)^i L_i(GF) \right). \end{aligned}$$

В частности, при $m = 2$

$$\bar{a} = a(1 - \text{tr}(FG) + |FG|);$$

при $l = 2$

$$\bar{a} = a(1 - \text{tr}(GF) + |GF|).$$

Если $m = l = 2$, то

$$\bar{a} = a(1 - \text{tr}(GF) + |G||F|).$$

Предположим для определенности, что $m \leq l$. Обозначим $\Gamma(i, m)$ множество упорядоченных выборок размера $1 \leq i \leq m$ из множества индексов $\{1, 2, \dots, m\}$. Введем матрицы E_γ , составленные из строк единичной матрицы с номерами из выборки $\gamma \in \Gamma(i, m)$. Тогда

$$L_i(FG) = \sum_{\gamma \in \Gamma(i, m)} |E_\gamma F G E_\gamma^T|.$$

В соответствии с формулой Бине—Коши [3]

$$|E_\gamma F G E_\gamma^T| = \sum_{\beta \in \Gamma(i, l)} |E_\gamma F E_\beta^T| |E_\beta G E_\gamma^T|.$$

Таким образом, зависимость \bar{a} от F имеет следующий вид:

$$\bar{a} = a \left(1 + \sum_{i=1}^m (-1)^i \sum_{\gamma \in \Gamma(i, m)} \sum_{\beta \in \Gamma(i, l)} |E_\gamma F E_\beta^T| |E_\beta G E_\gamma^T| \right).$$

Аналогичную формулу можно записать и в случае $m \geq l$.

Зададим желаемый характеристический многочлен матрицы замкнутой системы $b(\lambda)$. Коэффициенты обратной связи будем искать из равенства многочленов

$$\bar{a}(\lambda) = b(\lambda). \quad (2)$$

Зададим n различных вещественных чисел $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, не совпадающих с собственными числами матрицы A . Из равенства многочленов (2) получим

систему алгебраических уравнений относительно коэффициентов обратной связи

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m (-1)^i \sum_{\gamma \in \Gamma(i, m)} \sum_{\beta \in \Gamma(i, l)} |E_\gamma F E_\beta^T| |E_\beta G(\lambda_j) E_\gamma^T| = \\ = \frac{b(\lambda_j) - a(\lambda_j)}{a(\lambda_j)}, j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (3)$$

Число уравнений равно n , число неизвестных ml . Поэтому естественно потребовать, чтобы выполнялось неравенство $ml \geq n$. В общем случае данная система уравнений является нелинейной и может быть решена только численно. В некоторых случаях решение системы нелинейных алгебраических уравнений можно получить с помощью систем компьютерной математики, например, MATHEMATICA, MAPLE и др. Важно то, что можно сократить число уравнений и переменных, учитывая специфику зависимости \bar{a} от коэффициентов обратной связи.

Первое слагаемое в левой части j -го уравнения системы (3) равно $-\text{tr}(FG(\lambda_j))$. Перепишем систему (3) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{tr}(FG(\lambda_j)) = \\ = \sum_{i=2}^m (-1)^i \sum_{\gamma \in \Gamma(i, m)} \sum_{\beta \in \Gamma(i, l)} |E_\gamma F E_\beta^T| |E_\beta G(\lambda_j) E_\gamma^T| + \\ + \frac{a(\lambda_j) - b(\lambda_j)}{a(\lambda_j)}, j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (4)$$

Матрицу F запишем по столбцам

$$F = [f_1 \dots f_l],$$

матрицу $G(\lambda)$ — по строкам

$$G(\lambda) = \begin{bmatrix} g_1(\lambda) \\ \vdots \\ g_l(\lambda) \end{bmatrix}.$$

Составим векторы

$$g(\lambda) = [g_1(\lambda) \dots g_l(\lambda)], f = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_l \end{bmatrix}.$$

Тогда

$$\text{tr}(FG) = \text{tr}(GF) = gf.$$

Из элементов $|E_\gamma F E_\beta^T|$ составим вектор-столбец r . Заметим, что элементы r есть многочлены от элементов f . Обозначим зависимость r от f как $r = h(f)$.

Из элементов $|E_\beta G(\lambda) E_\gamma^T|$ составим вектор-строку $q(\lambda)$. Введем матрицы P , Q и вектор d , равные

$$P = \begin{bmatrix} g(\lambda_1) \\ \vdots \\ g(\lambda_n) \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} g(\lambda_1) \\ \vdots \\ g(\lambda_n) \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} \frac{a(\lambda_1) - b(\lambda_1)}{b(\lambda_1)} \\ \vdots \\ \frac{a(\lambda_n) - b(\lambda_n)}{b(\lambda_n)} \end{bmatrix}.$$

Система уравнений (4) принимает следующий вид:

$$Pf = Qr + d. \quad (5)$$

Пусть строки матрицы P линейно независимы, $\text{rank} P = n$. Тогда все множество решений системы (5) относительно f записывается в следующем виде:

$$f = P_1(Qr + d) + P_2v, \quad (6)$$

где $P_1 = P^T(PP^T)^{-1}$, столбцы P_2 образуют базис $\ker P$, вектор v является произвольным. Матрицы P_1 , P_2 имеют, соответственно, размеры $ml \times n$, $ml \times (ml - n)$. Число элементов в векторе v равно $ml - n$. При $ml = n$ формула (6) принимает вид

$$f = P^{-1}(Qr + d).$$

Подставим f в r . Получим новую систему уравнений

$$r = h(P_1(Qr + d) + P_2v) \quad (7)$$

относительно r и v . Число уравнений в системе (7) меньше, чем в исходной системе (3). Например, при $n = 4$, $m = 2$, $l = 2$ вектор r становится скалярной величиной. Система (7) записывается как одно квадратное уравнение. При $n = 6$, $m = 2$, $l = 3$ число уравнений и неизвестных в системе (7) равно 3.

Решаем систему уравнений (7), применяя системы компьютерной математики. Коэффициенты обратной связи находим по формуле (6).

Рассмотрим условия, при которых $\text{rank} P = n$. Введем обозначения для коэффициентов характеристического многочлена матрицы A :

$$a(\lambda) = \lambda^n + \alpha_1\lambda^{n-1} + \dots + \alpha_n.$$

Строки матрицы C обозначим c_i , $i = 1, \dots, l$. Строки передаточной матрицы можно записать в следующем виде [4]:

$$g_i(\lambda) = \frac{1}{a(\lambda)} [\lambda^{n-1} \lambda^{n-2} \dots 1] \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n-1} & \alpha_{n-2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_i B \\ c_i AB \\ \vdots \\ c_i A^{n-1} B \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Из (8) следует

Утверждение 1. Для матрицы P справедливо разложение $P = R_1 R_2 R_3 R_4$, где

$$R_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha(\lambda_1)} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\alpha(\lambda_n)} \end{bmatrix};$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \lambda_1^{n-1} & \lambda_1^{n-2} & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_n^{n-1} & \lambda_n^{n-2} & \dots & 1 \end{bmatrix};$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n-1} & \alpha_{n-2} & \dots & 1 \end{bmatrix};$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} c_1 B & \dots & c_l B \\ c_1 AB & \dots & c_l AB \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1 A^{n-1} B & \dots & c_l A^{n-1} B \end{bmatrix}.$$

Матрицы R_1 , R_3 — невырожденные. Матрица R_2 также невырожденная, поскольку все числа λ_i , $i = 1, 2, \dots, n$, различны. Следовательно, $\text{rank} P = n$ тогда и только тогда, когда $\text{rank} R_4 = n$.

Строки матрицы R_4 линейно зависимы, если $wR_4 = 0$ для некоторого вектора $w = [w_0 \dots w_{n-1}] \neq 0$. Это означает, что

$$\sum_{i=0}^{n-1} w_i c_1 A^i B = 0, \dots, \sum_{i=0}^{n-1} w_i c_l A^i B = 0$$

или

$$\sum_{i=0}^{n-1} w_i C A^i B = 0. \quad (9)$$

Условие (9) есть условие линейной зависимости последовательности матриц

$$CB, CAB, \dots, CA^{n-1}B \quad (10)$$

как элементов линейного пространства матриц $M_{l \times m}$. Следовательно, можно сделать заключение, что строки матрицы R_4 линейно зависимы, если и только если линейно зависимы матрицы (10). Таким образом, справедливо

Утверждение 2. Матрица P является матрицей полного ранга, $\text{rank} R_4 = n$, тогда и только тогда, когда матрицы $CB, CAB, \dots, CA^{n-1}B$ линейно независимы.

Рассмотрим систему четвертого порядка с двумя входами, двумя выходами. В системе уравнений (5)

$$P = \begin{bmatrix} g_1(\lambda_1) & g_2(\lambda_1) \\ g_1(\lambda_2) & g_2(\lambda_2) \\ g_1(\lambda_3) & g_2(\lambda_3) \\ g_1(\lambda_4) & g_2(\lambda_4) \end{bmatrix}; f = \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{12} \\ f_{22} \end{bmatrix};$$

$$Q = \begin{bmatrix} |G(\lambda_1)| \\ |G(\lambda_2)| \\ |G(\lambda_3)| \\ |G(\lambda_4)| \end{bmatrix}; d = \begin{bmatrix} (a(\lambda_1) - b(\lambda_1))/a(\lambda_1) \\ (a(\lambda_2) - b(\lambda_2))/a(\lambda_2) \\ (a(\lambda_3) - b(\lambda_3))/a(\lambda_3) \\ (a(\lambda_4) - b(\lambda_4))/a(\lambda_4) \end{bmatrix}.$$

Вектор r в данном случае является скалярной величиной

$$r = |F| = f_{11}f_{22} - f_{12}f_{21} = f^T N f, \quad (11)$$

где

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Подставим $f = P^{-1}(Qr + d)$ в соотношение (11). Получим квадратное уравнение

$$k_0 r^2 + k_1 r + k_2 = 0, \quad (12)$$

где $k_0 = Q^T(P^{-1})^T N P^{-1} Q$; $k_1 = 2Q^T(P^{-1})^T N P^{-1} d - 1$; $k_2 = d^T(P^{-1})^T N P^{-1} d$. Пусть $k_1^2 > 4k_0 k_2$. Тогда существует два различных вещественных корня r_1, r_2 уравнения (12). Соответственно, получаем два решения системы (5)

$$f_1 = P^{-1} Q r_1 + P^{-1} d; f_2 = P^{-1} Q r_2 + P^{-1} d.$$

При $k_1^2 = 4k_0 k_2$ существует вещественный корень кратности 2, и, таким образом, система (5) имеет единственное решение. При $k_1^2 < 4k_0 k_2$ уравнение (12) вещественных решений не имеет, соответственно не имеет вещественных решений система (5).

Таким образом, если матрица P невырожденная, т. е. матрицы CB, CAB, CA^2B, CA^3B линейно независимы, и $k_1^2 \geq 4k_0 k_2$, то решение задачи модального синтеза для системы четвертого порядка с двумя входами, двумя выходами существует и может быть найдено как решение системы линейных алгебраических уравнений.

Пример решения задачи модального синтеза

Рассмотрим боковое движение самолета [5]. Переменными состояниями являются: x_1 — угол скольжения; x_2 — угловая скорость крена; x_3 — угловая скорость рыскания; x_4 — угол крена. Переменные управления: u_1 — угол отклонения рулей направления; u_2 — угол отклонения элеронов. Матрицы системы равны [5]

$$A = \begin{bmatrix} -0,152 & 0,4226 & 0,9063 & 0,096 \\ -18,643 & -1,06 & -1,6 & 0 \\ -1,757 & -0,153 & -0,136 & 0 \\ 0 & 1 & -0,4663 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} -0,032 & 0 \\ -1,874 & -8,966 \\ -1,46 & 0,304 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Предположим, что измеряются угловая скорость крена и угол крена, угол скольжения и угловая скорость рыскания измерению не доступны. Следовательно,

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Задача модального синтеза заключается в построении матрицы обратной связи

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix},$$

при которой характеристический многочлен матрицы замкнутой системы $A + BFC$ совпадает с заданным многочленом $b(\lambda)$. Многочлен $b(\lambda)$ зададим в виде многочлена Баттерворта:

$$b(\lambda) = \lambda^4 + 2,6\omega\lambda^3 + 3,4\omega^2\lambda^2 + 2,6\omega^3\lambda + \omega^4$$

с $\omega = 5$.

Положим $\lambda_i = i, i = 1, \dots, 4$. Матрицы P, Q и вектор d в системе уравнений (5) равны:

$$P = \begin{bmatrix} 1,7016 & -2,4404 & 2,2759 & -2,9367 \\ 0,5649 & -1,8439 & 0,4242 & -1,0276 \\ 0,1745 & -1,5955 & 0,1229 & -0,5726 \\ 0,0105 & -1,4074 & 0,0401 & -0,3721 \end{bmatrix};$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0,5570 \\ 0,2017 \\ 0,0962 \\ 0,0525 \end{bmatrix}; d = \begin{bmatrix} -82,25 \\ -25,14 \\ -12,62 \\ -7,783 \end{bmatrix}.$$

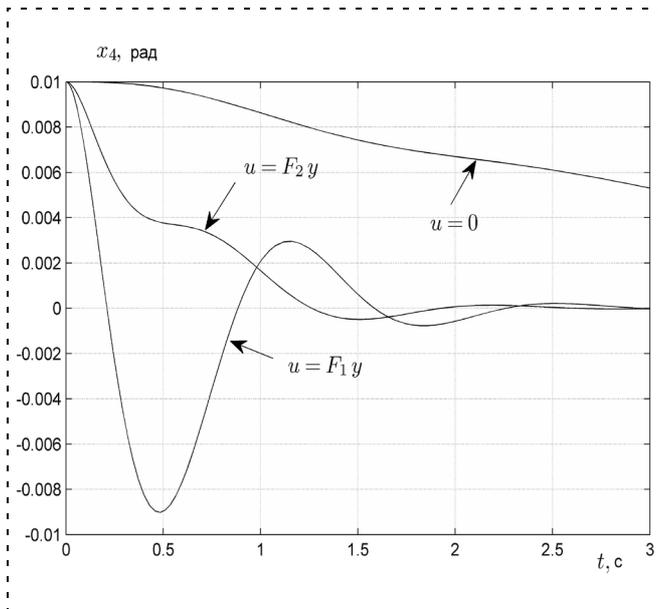


Рис. 1. Переходный процесс по углу крена

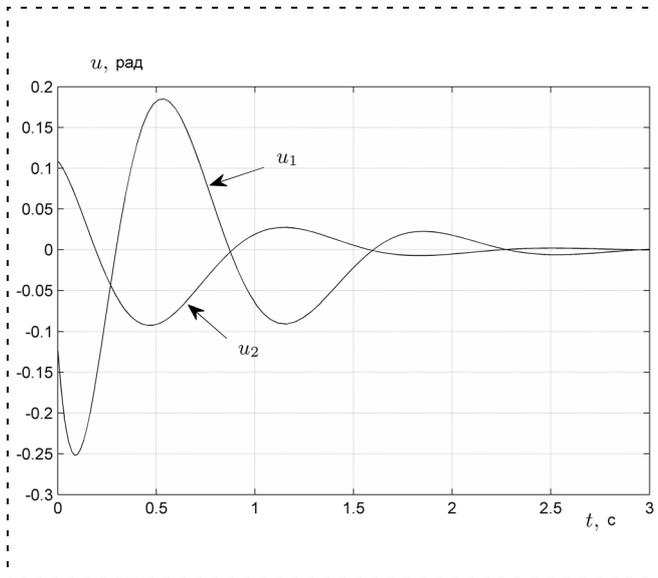


Рис. 2. Управление $u = F_1y$

Уравнение (12) имеет два корня: $r_1 = 52,41$, $r_2 = -7,756$. Этим корням соответствуют два решения системы уравнений (5), из которых составляем две матрицы обратной связи:

$$F_1 = \begin{bmatrix} 4,384 & -12,12 \\ 0,3832 & 10,9 \end{bmatrix}; F_2 = \begin{bmatrix} -10,23 & -17,95 \\ 3,437 & 6,791 \end{bmatrix}.$$

Проверка показывает, что характеристический многочлен замкнутой системы совпадает с заданным многочленом. На рис. 1–3 показаны резуль-

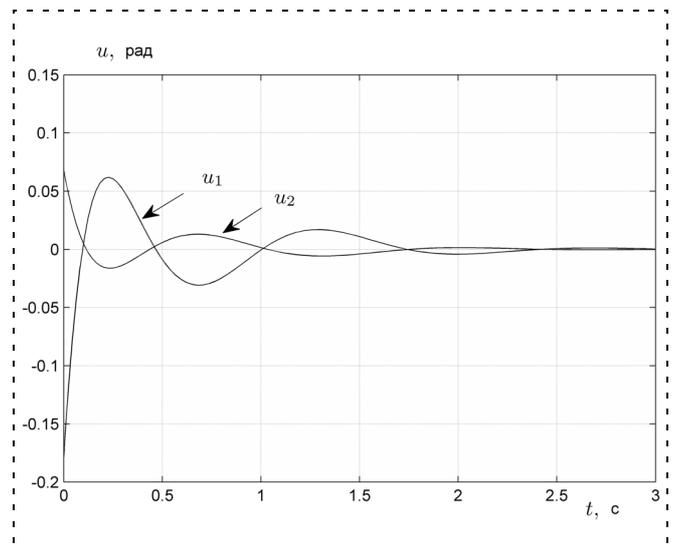


Рис. 3. Управление $u = F_2y$

таты моделирования при начальном состоянии $x(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0,01]^T$ и управлениях $u = 0$, $u = F_1y$, $u = F_2y$.

Заключение

Предложен метод численного решения задачи модального синтеза для системы с обратной связью по выходу. Суть метода заключается в декомпозиции задачи расчета коэффициентов обратной связи на две задачи. Первая является задачей решения системы линейных алгебраических уравнений, вторая — задачей решения системы нелинейных алгебраических уравнений, число переменных и уравнений в которой меньше, чем в исходной задаче. Численное решение задачи синтеза стабилизирующей обратной связи для системы управления боковым движением самолета подтверждает возможность применения данного метода для решения практических задач синтеза систем автоматического управления многосвязными объектами с неполной информацией о состоянии.

Список литературы

1. Поляк Б. Т., Шербаков П. С. Трудные задачи линейной теории управления. Некоторые подходы к решению // Автоматика и телемеханика, 2005. № 5. С. 7–46.
2. Eremenko A., Gabrielov A. Pole placement by static output feedback for generic linear systems // SIAM Journal on Control and Optimization. 2002. V. 41. N 1. P. 303–312.
3. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М.: Мир, 1989.
4. Параев Ю. И. Алгебраические методы в теории систем управления. Томск: Изд-во ТГУ, 1980.
5. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Издательство научной литературы Н. Ф. Бочкаревой, 2006.

А. В. Кочемасов, канд. техн. наук, проф.,

В. В. Володин, аспирант,

Московский государственный институт
радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет)

kotchmassov@mirea.ru

Определение сингулярных решений краевых задач в динамических системах на основе процедуры разложения на ортогональные подпространства

Предлагается на основе процедуры разложения на ортогональные подпространства выделить сингулярные составляющие полного решения дифференциальных уравнений, описывающих сложную динамическую систему, соответствующие особым точкам границы области устойчивости.

Ключевые слова: сингулярные решения, сингулярные точки, регулярные решения, полное решение, ортогонализация, ортогональные разложения, коэффициенты передачи отдельных контуров системы, динамическая система.

Введение

В краевых задачах кроме регулярных решений, непрерывных и дифференцируемых внутри областей устойчивости и на границе (в соответствии с граничными условиями), существуют решения, непрерывные и дифференцируемые внутри области устойчивости, для которых могут быть не определены производные в отдельных точках границы. В окрестности этих особых точек решение краевых задач, будучи непрерывным, имеет особенности в отношении производных, при этом решение носит степенной характер. Эти точки границы носят название сингулярных точек, а соответствующие им решения называются сингулярными решениями [1].

Известно, что в задачах, связанных с анализом робастности устойчивости синтезируемых динамических систем, например, при анализе и синтезе моделей летательных аппаратов, очень важно получить алгоритм отыскания критического коэффициента усиления системы. Используя сингулярные составляющие полного решения дифференциальных уравнений, описывающих динамическую систему, можно получить коэффициенты передачи отдельных контуров такой системы, что поможет определить критический коэффициент усиления [2].

Особенности проблемы построения сингулярных решений

В проблеме построения сингулярных решений условно можно выделить два этапа. Первый связан с определением сингулярного решения как разло-

жения по системе собственных элементов и с выделением в этом разложении составляющей, обеспечивающей непрерывность смещений в сингулярной точке.

Второй этап, связанный с определением амплитуды в сингулярном решении, является принципиальным, ибо требует решения задачи в целом. Кратко опишем последовательность построения сингулярного решения. Нетрудно убедиться (например, путем использования преобразования Лапласа), что асимптотика сингулярного решения в окрестности особой точки должна иметь вид степенной зависимости [1].

Будем использовать процедуру разложения полного решения задачи, т. е. вектора перемещений, на ортогональные кинематические пространства и выделять сингулярную составляющую решения в ортогональное подпространство к регулярной части решения.

Ортогонализация подпространства реализуется таким образом, что лагранжиан исходной задачи записывается в аддитивной форме, в виде суммы лагранжианов для составляющих решения из ортогональных подпространств. Предполагается, что если коэффициенты при сингулярной составляющей выбраны и реализуется ортогональность регулярной и сингулярной составляющих, то эти коэффициенты являются коэффициентами передачи отдельных контуров динамической системы.

Интегральный анализ тригонометрических рядов Фурье (интегральное преобразование Фурье) в некоторых задачах используется для построения точного решения. Представление решения в виде одинарных тригонометрических рядов соответствует использованию ортогональных однородных решений. В общем случае ортогональные однородные решения позволяют построить точные решения только тогда, когда на двух противоположных границах области заданы перекрестные граничные условия, при которых одновременно задаются, например, нормальные составляющие внешних воздействий и касательные составляющие перемещений. Отметим особенность построения решений в форме разложения по однородным решениям (ортогональным или не ортогональным). Так как решения строятся в канонических областях с угловыми точками, то при некоторых типах граничных условий на части границ, примыкающих к угловым точкам, решения могут стать иррегулярными.

Однако от функций, представленных в виде равномерно сходящихся на рассматриваемых интервалах разложений по однородным решениям, требуется, по крайней мере, ограниченное изменение на этом интервале, т. е. так определяются только регулярные составляющие искомого решения [3].

Поэтому при построении этого решения в виде разложения по однородным функциям необходимо предварительно выделить сингулярную составляю-

щую в частное решение. Следует отметить, что изучение сингулярных решений представляет и самостоятельный интерес, так как они могут являться основой для анализа аварийности (нарушения работоспособности) сложных динамических систем [4, 5].

Построение сингулярного решения с помощью метода Ритца

В теории и практике применения прямых методов во многих случаях задачу интегрирования дифференциального уравнения можно заменить равносильной задачей об определении функции, сообщающей некоторому интегралу наименьшее значение, т. е. "вариационной задачей".

К наиболее известным прямым методам, в которых используется вариационная постановка задачи, можно отнести метод Ритца, Бубнова—Галеркина, Канторовича. Вальтер Ритц предложил (1908 г.) метод приближенного решения вариационных и краевых задач, которые сводятся к вариационным ("метод Ритца").

Пусть задан функционал $F(y(x))$, и требуется найти такую функцию $y(x)$, принимающую в точках x_0 и x_1 заданные значения

$$a = y(x_0) \text{ и } b = y(x_1), \quad (1)$$

на которой функционал $F(y(x))$ будет достигать экстремума. Значения исследуемого на экстремум функционала $F(y(x))$ рассматриваются не на всех допустимых в данной задаче функциях $y(x)$, а лишь на всевозможных линейных комбинациях вида

$$y_n(x) = \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(x) \text{ с постоянными коэффициентами } a_i,$$

составленных из n первых функций некоторой выбранной системы $\varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_n(x), \dots$ (от удачного выбора этой системы функций зависит эффективность применения метода к решению конкретных задач). Необходимым условием выбора системы функций $\varphi_i(x)$ является требование, чтобы функции $y_n(x)$ удовлетворяли условиям $y_n(x_0) = a$ и $y_n(x_1) = b$ для всех значений параметров a_i . При таком выборе функций $y_n(x)$ функционал $F(y(x))$ превращается в функцию $\Phi(a_1, a_2, \dots, a_n)$ коэффициентов a_i , которые выбирают так, чтобы эта функция достигла экстремума, т. е. определяют их из системы уравнений

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

Предлагается следующий алгоритм построения части решения. Сначала в окрестности сингулярной точки известными методами строится функ-

ция, являющаяся асимптотикой сингулярного решения в окрестности исследуемой точки [6].

Далее на основе процедуры разложения на ортогональные подпространства предлагается выделить сингулярные составляющие в ортогональные подпространства. Коэффициенты, осуществляющие такое разложение, предлагается трактовать как коэффициенты передачи отдельных контуров динамической системы.

Пусть функция $R_s(x, y)$ является асимптотикой сингулярного решения в окрестности особой точки (x_0, y_0) . Функцию $R_s(x, y)$ можно записать в виде сингулярной вектор-функции

$$R_{is}(x, y) = \operatorname{Re}(A_i r^\lambda e^{i\varphi\lambda}), \quad (3)$$

где r и φ — полярные координаты, связанные с сингулярной точкой; $r = |z| = (x^2 + y^2)^{1/2}$, $z = x + iy$, $\varphi = \operatorname{Arctg} \frac{y}{x}$, A_i — постоянный коэффициент функции $\varphi(x)$, удовлетворяющий условиям разложимости в ряд Фурье; λ — члены характеристического уравнения $\alpha\lambda \sin \lambda - \cos \lambda = 0$ с корнями λ_m и λ_n .

Производные функции R_{is} по координатам имеют вид

$$\frac{\partial R_{is}}{\partial y} = \frac{\partial R_{is}}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial y} - \operatorname{Re}(i\lambda A_i z^{\lambda-1}) = \operatorname{Re}(iA_i \lambda r^{\lambda-1} e^{i\varphi(\lambda-1)});$$

$$\frac{\partial R_{is}}{\partial x} = \operatorname{Re}(\lambda A_i z^{\lambda-1}) = \operatorname{Re}(A_i \lambda r^{\lambda-1} e^{i\varphi(\lambda-1)}).$$

В окрестности сингулярной точки записанные производные имеют степенную зависимость.

Рассмотрим интеграл

$$I_{\alpha\beta ij} = \iint \frac{\partial R_{is\alpha}}{\partial x_i} \frac{\partial R_{is\beta}}{\partial x_j} dF,$$

где α, β — индексы порядка оператора S ; $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$; F — функция, обладающая свойством ортогональности в системе функций $F_n = \{\sin \lambda_n x\}$, $F_m = \{\cos \lambda_m x\}$ на интервале $[-1, 1]$.

Перейдем к полярным координатам, связанным с сингулярной точкой. Можно видеть, что интеграл $I_{\alpha\beta ij}$, который определяется интегралами

$$\iint \frac{\partial R_{is\alpha}}{\partial y} \frac{\partial R_{is\beta}}{\partial y} dF, \iint \frac{\partial R_{is\alpha}}{\partial x} \frac{\partial R_{is\beta}}{\partial x} dF, \iint \frac{\partial R_{is\alpha}}{\partial y} \frac{\partial R_{is\beta}}{\partial x} dF, \quad \alpha, \beta = 1, 2, \dots, n,$$

будет конечным в сингулярной точке [7], так как конечным является выражение

$$\int_0^{2\pi} \int_0^r r^{\lambda-1} r^{\lambda-1} \begin{pmatrix} \sin^2 \varphi(\lambda-1) \\ \sin 2\varphi(\lambda-1) \\ \cos^2 \varphi(\lambda-1) \end{pmatrix} r dr d\varphi.$$

Уравнение $r = r(\varphi)$ задает контур ограниченной области для рассматриваемой задачи, сингулярная точка (x_0, y_0) является внутренней точкой области.

В соответствии с общей схемой осуществления ортогональных разложений определим в качестве подпространства R_i^k подпространство сингулярных составляющих, а в качестве ортогонального дополнения к нему \bar{R}_i — все регулярные решения. Решение ищется в виде разложения $R_{xy} = b_{mn}X_m(x)Y_n(y)$, где $X_m(x)$, $Y_n(y)$ — функции, обладающие свойством ортогональности, а их производные таким свойством не обладают; b_{mn} — коэффициенты минимизирующей системы функций (1), (2), полученные при реализации процедуры Ритца с помощью преобразования Фурье. Для обеспечения ортогональности коэффициентов при выделенных кинематических состояниях R_i^k должны быть определены соотношения

$$U_{mn}b_{mn} = A_m, \quad (4)$$

где A_m — коэффициенты из уравнения (3), где присутствует последовательность (A_1, \dots, A_n, A_m) , а U_{mn} — функция управления перемещением объекта при заданном алгоритме управления.

Если подпространство R_i^k порождено одной сингулярной вектор-функцией R_{is} , то получаем

$$b_m = \frac{U_{mn}}{A_m}.$$

Коэффициенты b_m будем принимать за коэффициенты передачи отдельных контуров динамической системы.

Уточненный алгоритм определения коэффициентов передачи отдельных контуров динамической системы

Пусть R_{is} — вектор-функция, определяющая кинематическое состояние в окрестности сингулярной точки. Полагаем далее, что в дополнительном подпространстве кинематических состояний решение ищется в форме разложения по полной системе функций R_i^k :

$$\bar{R}_i(x, y) = \sum_i^k a_k R_i^k(x, y), \quad (5)$$

где a_k — коэффициенты разложения в подпространстве \bar{R}_i , $k = 1, 2, \dots, \infty$, $i = 1, 2, \dots, n$.

В соответствии с предложенным методом ортогонализации имеет место условие ортогональности:

$$[\bar{R}_i, R_{is}] = 0 \text{ или } \sum_i^k a_k [R_i^k, R_{is}] = 0.$$

Подпространству \bar{R} принадлежит и регулярное решение. Возникает вопрос, каким образом регулярная часть решения может быть выделена полностью?

В соответствии с общим подходом будем считать, что полное решение задачи представляется в виде прямой суммы подпространств.

Будем считать, что некоторое решение является регулярным, если оно не содержит сингулярной составляющей, иначе говоря, если в разложение этого решения сингулярная составляющая входит с нулевой амплитудой. Пусть полное решение из подпространства \bar{R} содержит как регулярную, так и сингулярную части.

Тогда можно записать: $\bar{R}_i(x, y) = \sum_i^k (a_k R_i^k(x, y) + a_s R_{is})$, и выполняется условие

$$[\bar{R}_i, R_{is}] = 0 \text{ или } \sum_i^k (a_k [R_i^k, R_{is}] + a_s [R_{is}, R_{is}]) = 0. \quad (6)$$

Возьмем теперь вместо системы $R_i^k(x, y)$ в разложении (5) систему функций R_{is}^k :

$$R_{is}^k = R_i^k - R_{is} \frac{[R_i^k, R_{is}]}{[R_{is}, R_{is}]}.$$

Тогда из (6) следует сразу, что $a_s = 0$. Тогда полное решение из \bar{R} строится в форме разложения по системе функций $\{R_{is}^k\}$ и имеет вид системы уравнений:

$$a_k [R_{is}^k, R_{is}^m] = \int_V \bar{X}_i R_{is}^m dV + \int_{\Gamma} \bar{Y}_i R_{is}^m ds, \quad (7)$$

где V и Γ — пространства кинематических состояний.

В результате решение исходной проблемы с сингулярной точкой записывается в следующем виде:

$$R_i(x, y) = b_m R_{is}^0 + \sum_i^k a_k R_{is}^k$$

или $R_i(x, y) = \left(b_m - \sum_i^k a_k \frac{[R_i^k, R_{is}^0]}{[R_{is}^0, R_{is}^0]} \right) R_{is}^0 + \sum_i^k a_k R_{is}^k.$

Второе слагаемое в записанном выражении определяет регулярную составляющую решения. Первое слагаемое дает полное решение проблемы опреде-

ления коэффициентов передачи отдельных контуров динамической системы.

Коэффициенты передачи находятся по формуле

$$K_m = b_m - \sum_i^k a_k \frac{[R_i^k, R_{is}^0]}{[R_{is}^0, R_{is}^0]} \quad (8)$$

Здесь b_m находится по асимптотике R_{is}^0 в заданной системе $X_i(s)$, $Y_i(s)$, a_k и является решением системы уравнений (7).

Отметим следующее обстоятельство. Даже если система функций R_i^k является ортогональной, система модифицированных функций R_{is}^k ортогональной не является. Это несколько затрудняет решение вспомогательной задачи определения a_k даже в канонических областях. Тем не менее, в статье показано, что проблема определения не только приближенных, но и точных коэффициентов (8) системы уравнений (7) при выполнении некоторых условий

вполне решаема. Это имеет важное значение при анализе и синтезе высокоточных динамических систем.

Список литературы

1. Гельфанд И. М., Шилов Р. Е. Пространства основных и обобщенных функций. М.: ГИМФЛ, 1958. 307 с.
2. Теряев Е. Д., Шамриков Б. М. Цифровые системы и поэтапное адаптивное управление. М.: Наука, 1999. 330 с.
3. Андриевский Б. Р., Фрадков А. П. Избранные главы теории автоматического управления. СПб.: Наука, 1999. 467 с.
4. Петров Ю. П. Устойчивость линейных систем при вариациях параметров // Автоматика и телемеханика. 1994. № 11. С. 186–189.
5. Дорри М. Х., Кочемасов А. В. Проблема сохранения работоспособности систем управления при эквивалентных преобразованиях // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 3. С. 2–5.
6. Володин В. В., Кочемасов А. В. Устойчивость мехатронных систем на основе анализа сингулярных решений // Материалы 2-й Российской мультиконференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. — С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2008. С. 56–59.
7. Годунов С. К. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1979. — 182 с.

Информация

VIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2009

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ И КОНФЕРЕНЦИИ

24 - 27
НОЯБРЯ 2009 г.

МЕТАЛЛО-ОБРАБОТКА
МЕТАЛЛОСНАБЖЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

УКРАИНА TEX
ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

UKRTOP TEX
КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНИКА
ОБОРУДОВАНИЕ

UKRNAS TEX
ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И ИНФРАСТРУКТУРЫ

ГИДРАВЛИКА И ПНЕВМАТИКА

ПОДШИПНИКИ

УКРПРОМ АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОМЫШЛЕННАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ

УКРСВАРКА
ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ
И МАТЕРИАЛЫ

ОБРАЗЦЫ, СТАНДАРТЫ, ЭТАЛОНЫ, ПРИБОРЫ
КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫЕ ПРИБОРЫ,
ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ
ОБОРУДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО СЕРТИФИКАЦИИ

ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ СКЛАДСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА
ОЦЕНКА ЗАРЯД, БЕЗОПАСНОСТЬ
ПРОИЗВОДСТВА

СУБМОНТАЖИ
РАЗВИТИЕ ЗНАКОМ КООПЕРАЦИИ



Генеральные информационные партнеры:
AIBiz, Ufi Approved Event

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
Украина, Киев, Броварской пр-т, 15
М "Левобережная"

ОРГАНИЗАТОРЫ:
Министерство промышленной политики Украины
ООО "Международный выставочный центр"
Украинская Национальная Компания "Укрстанкоинструмент"

IEC

ООО "Международный выставочный центр"
Украина, 02660, Киев, Броварской пр-т, 15
☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: lilia@iec-expo.com.ua
www.tech-expo.com.ua

Информационная поддержка:



АВТОМАТИЧЕСКОЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 621.365.2:669.187

Б. Н. Парсункин, д-р техн. наук, проф.,
С. М. Андреев, канд. техн. наук, доц.,
Е. Н. Ишметьев, канд. техн. наук,
М. В. Усачев, аспирант,
Е. С. Михальченко, ассистент,
А. К. Наливкин, аспирант,
Магнитогорский государственный
технический университет им. Г. И. Носова
mika.elena@mail.ru

Синтез системы оптимального управления электрическим режимом сверхмощной дуговой сталеплавильной печи ДСП-180

Рассмотрена система оптимального управления электрическим режимом ДСП-180. В качестве цели оптимизации управления энергетическим режимом сверхмощной ДСП-180 выбрано обеспечение максимально возможной часовой производительности печи путем поддержания максимальной мощности дуги. Представлено исследование работы предлагаемой системы автоматической оптимизации, реализованной на компьютеризированном стенде. Разработана структурная схема предлагаемого метода коррекции энергетического режима электродуговой плавки.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрический режим, критерий оптимизации, электрическая мощность, система автоматической оптимизации, коррекция энергетического режима.

Сверхмощная дуговая сталеплавильная печь ДСП-180 как объект управления

В условиях высокопроизводительного электросталеплавильного производства сверхмощные дуговые печи переменного тока ДСП используются в основном как технологические агрегаты для расплавления металлошихты и нагрева расплава до заданной температуры.

Технологические операции по доводке металла по химическому составу и нагреву металла до температуры, обеспечивающей нормальную разливку стали, осуществляются в агрегатах внепечной обработки стали.

В данной статье в качестве конкретного примера объекта управления для синтеза системы оптимального управления электрическим режимом рассмот-

рены сверхмощные ДСП-180 нового электросталеплавильного цеха ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат".

Современная технология, используемая на ДСП-180, предусматривает:

- использование при шихтовке плавки до 40 % жидкого чугуна;
- интенсивную продувку расплава кислородом;
- использование в качестве дополнительного источника тепловой энергии от сжигания природного газа, подаваемого через комбинированные газокислородные горелки-фурмы (шесть фурм RCB, каждая мощностью по 3,5 МВт);
- применение для дожига CO двух кислородных фурм-инжекторов PCI;
- использование донной продувки расплава аргоном (три пористые вставки 1,2...3,6 м³/ч);
- вдувание углеродосодержащих материалов для получения вспененного шлака (20...100 кг/мин).

Комбинированные газокислородные горелки-фурмы RCB и фурмы-инжекторы PCI установлены в боковых водоохлаждаемых панелях рабочего пространства.

Управление электрическим режимом сверхмощной ДСП-180 осуществляется эффективной системой ArCOS, реализующей программно заданный шаговый режим энергопотребления в процессе электродуговой плавки, по одному из пяти возможных профилей.

Директивно заданный в табличной форме программный режим энергопотребления ДСП-180 предусматривает установку заданной степени напряжения печного трансформатора, заданной степени реактора и заданного значения импеданса (полного сопротивления короткой сети) на каждом шаге программы по ходу плавки.

Переключение режима энергопотребления на следующий шаг программы в ArCOS осуществляется автоматически, индивидуально после загрузки в ДСП-180 очередной корзины (бадьи) металлошихты по мере потребления заданного количества электрической энергии.

Характерный режим энергопотребления ДСП-180 при выплавке металла по профилю № 3 (25 % жидкого чугуна и 75 % металлошихты) представлен на рис. 1.

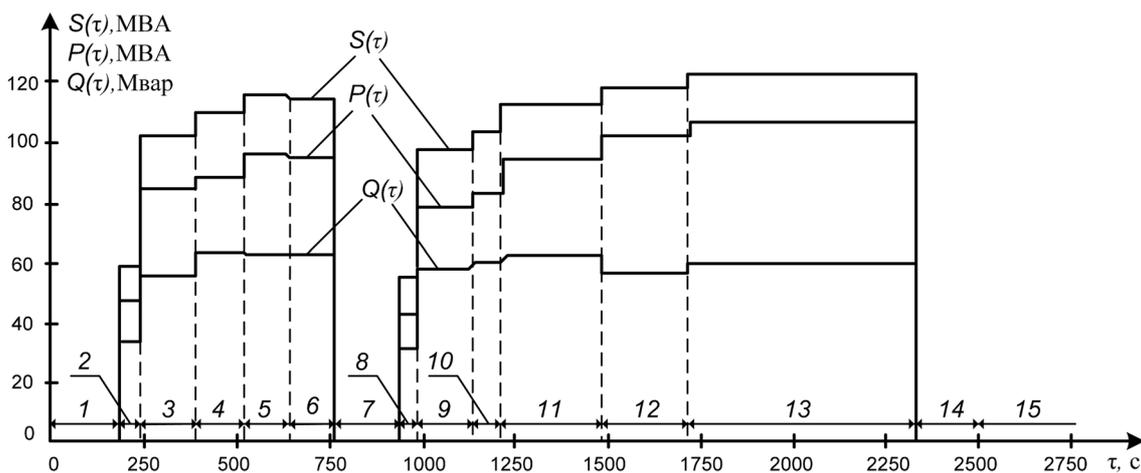


Рис. 1. Изменение во времени величин полной мощности — $S(\tau)$, активной мощности — $P(\tau)$ и реактивной мощности — $Q(\tau)$ при выплавке стали в ДСП-180 по профилю № 3: интервалы времени 2—6 и 8—13 — работа под током; интервалы времени 1, 7, 14 и 15 — технологические простои

Плавка проведена по режиму "завалка + заливка чугуна и подвалка". Продолжительности отдельных интервалов времени от 2—6 до 8—13, на которых стабилизирован электрический режим, отражены на рис. 1.

Продолжительности интервалов времени для выполнения технологических операций при отключении ДСП-180 (рис. 1) отражены интервалами 1, 7, 14 и 15, где интервал 14 — продолжительность выпуска плавки.

Использование в шихте жидкого чугуна, продувка расплава кислородом (до 2800 м³/ч через каждую из пяти RCB), сжигание природного газа (до 350 м³/ч через каждую из шести RCB) обуславливают значительное изменение текущих температурных и технологических условий в рабочем пространстве ДСП-180, а значит, и условий горения электрических дуг.

Это обстоятельство определяет очевидную необходимость коррекции текущего программно заданного электрического режима в интервалах времени t_i (рис. 1) между последующими шагами программного переключения путем использования оптимизации управления электрическим режимом.

Выбор критерия оптимизации электрического режима ДСП-180

Для оптимизации управления энергетическим режимом ДСП необходимо выбрать критерий (цель) управления. Критерий должен обеспечивать достижение и поддержание выбранного итогового показателя эффективности технологического процесса

выплавки стали в ДСП на экстремальном (наилучшем) значении.

Принципиально в течение каждой текущей электроплавки можно обеспечить реализацию только одной из двух возможных основных целей оптимизации управления энергетическим режимом ДСП:

1) максимально возможную производительность ДСП или минимально возможную продолжительность электроплавки при безусловном соблюдении всех технологических требований по качеству и параметрам выплавляемого металла (критерий максимального быстродействия);

2) минимально возможное удельное количество дорогостоящей электрической энергии, затраченной на выплавку тонны металла, или минимальную себестоимость выплавки стали в ДСП при безоговорочном производстве заданного количества металла определенного качества (критерий наибольшей экономической эффективности электрометаллургического процесса).

Критерий максимального быстродействия наиболее эффективно использовать, если оптимизируемый процесс является "узким местом" в поточном технологическом процессе электросталеплавильного производства.

Необходимым и обязательным условием возможности оптимизации управления технологическим процессом электросталеплавильного производства является наличие унимодального (одноэкстремального) вида статической характеристики оптимизируемого процесса в координатах "управляющее воздействие" — "выходной оптимизируемый параметр".

Управление электрическим режимом энергопотребления ДСП возможно двумя способами:

- изменением величины подводимого к электродам напряжения путем переключения ступеней напряжения печного трансформатора (23 ступени при изменении напряжения от 800 до 1400 В);
- при постоянном напряжении питания путем изменения положения электрода (длины дуги) в каждой фазе относительно уровня металлошихты или расплава.

В условиях высокопроизводительного поточного электросталеплавильного производства наиболее приемлемой целью оптимизации управления энергетическим режимом ДСП является обеспечение максимально возможной часовой производительности печей — $G(\tau)_{\max}$.

Для предварительного расчета часовой производительности ДСП-180 в зависимости от значения тока дуги при различных значениях напряжения питания была использована методика, предложенная Ю. Е. Ефроймовичем [1] и скорректированная для условий работы сверхмощных ДСП по современной технологии и при использовании водоохлаждаемых элементов конструкции рабочего пространства.

Приближенные расчетные статические зависимости (статические характеристики) часовой производительности ДСП-180 от значения тока дуги при различных напряжениях печного трансформатора $G(\tau) = f_1[I_d(\tau)]$ представлены на рис. 2.

Экспериментальные данные, полученные при анализе результатов 47 плавков по двум наиболее часто используемым профилям шихтовки показывают, что доля альтернативных источников энергии (тепла от сжигания газа и экзотермических реакций окисления и т. д.) в общем количестве энергии, потребляемой за плавку, не превышает 20...30 %.

Анализ полученных расчетных зависимостей: текущей потребляемой (активной) электрической мощности — $P_a(\tau) = f[I_d(\tau)]$; текущей электрической мощности, выделяемой в дуге — $P_d(\tau) = Y[I_d(\tau)]$; текущего значения часовой производительности ДСП — $G(\tau) = f_1[I_d(\tau)]$ от текущего значения тока дуги $I_d(\tau)$ для различных величин напряжения питания показывает, что и для условий сверхмощных ДСП, работающих по современной технологии, справедливо следующее положение [1, 2]: максимум текущей производительности ДСП $G(\tau)_{\max}$ достигается при текущих значениях рабочих токов $I_d(\tau)$, которые соответствуют максимуму мощности, выделяемой в электрической дуге $P_d(\tau)_{\max}$ для выбранной ступени напряжения.

Значит, для определения и поддержания максимально возможной текущей производительности ДСП $G(\tau)_{\max}$ необходимо для установленной ступени

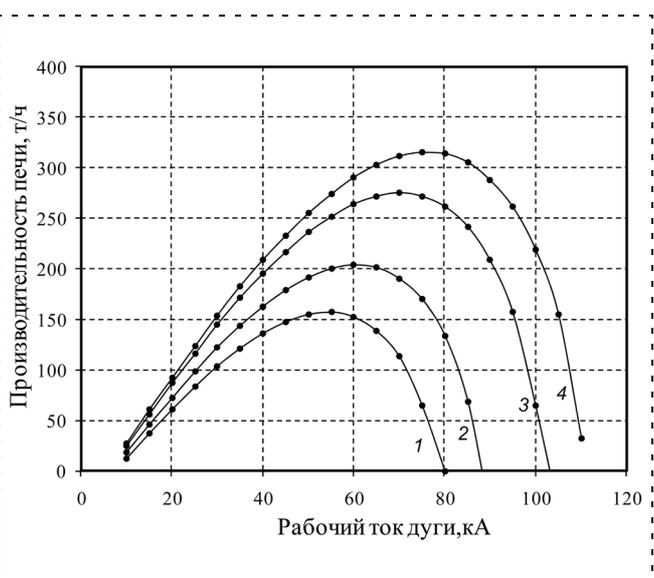


Рис. 2. Расчетные зависимости часовой производительности ДСП-180 от рабочего тока дуги при различных напряжениях печного трансформатора:

1 — $U_l = 1045$ В; 2 — $U_l = 1155$ В; 3 — $U_l = 1290$ В; 4 — $U_l = 1345$ В

пени напряжения определить и поддерживать такое текущее (оптимальное) значение тока дуги $I_d(\tau)_{\text{опт}}$, при котором обеспечивается выделение максимально возможной электрической мощности дуги $P_d(\tau)_{\max}$.

Значение рабочего тока дуги в каждой фазе определяется напряжением питания, длиной дуги (L_d) и сопротивлением (импедансом) короткой подводящей сети.

Для снижения перегрева водоохлаждаемых элементов рабочего пространства электрические дуги должны гореть в специально наведенном путем вдувания углеродосодержащих материалов пенистом шлаке.

Полученные с использованием скорректированной упрощенной методики [1] предварительные расчетные зависимости удельного количества электрической энергии от рабочего тока дуги $W(\tau) = f_2[I_d(\tau)]$ и себестоимости выплавки 1 т стали (вернее, переменной составляющей себестоимости) от рабочего тока дуги $\Psi(\tau) = f_3[I_d(\tau)]$ позволили сделать выводы, подтверждающие справедливое положение для дуговых печей малой мощности.

Зависимости $W(\tau) = f_2[I_d(\tau)]$ и $\Psi(\tau) = f_3[I_d(\tau)]$ имеют экстремальный вид и принципиально могут быть использованы в качестве критерия оптимизации управления энергетическим режимом ДСП-180.

Удельное количество электрической энергии $W(\tau)$ и себестоимость стали, выплавляемой в сверхмощной ДСП-180, снижаются с увеличением напряжения питания печного трансформатора.

В диапазоне значений рабочих токов $I_d(\tau) = 60...80$ кА, соответствующих максимальной производительности ДСП-180 при различных значени-

ях напряжения питания (рис. 2), изменения величин $W(\tau)$ и $\Pi(\tau)$ незначительны, поскольку увеличение затрат электрической энергии сопровождается увеличением производительности печи.

Минимальные значения экономических показателей эффективности технологического процесса выплавки стали в сверхмощной ДСП-180 достигаются при меньших значениях рабочих токов $I_d(\tau) = 50...70$ кА для соответствующих ступеней напряжения, чем значения токов, соответствующие достижению мощностей $P_d(\tau)_{\max}$ и $P_a(\tau)_{\max}$, определяющих максимально возможную производительность $G(\tau)_{\max}$ печи.

Подходы к реализации системы оптимального управления энергетическим режимом ДСП

Принцип оптимизации управления энергетическим режимом ДСП по ходу электродуговой плавки определяется основополагающей зависимостью [1, 3]

$$L_d = \frac{(\sqrt{U_{\phi}^2 - [I_d(x + x_p)]^2} - I_d r - a)}{b},$$

где L_d — длина столба дуги; $a = U_k + U_a$ — падение напряжения в катодной (U_k) и анодной (U_a) областях электрической дуги; b — градиент потенциала в столбе дуги; I_d — ток дуги каждой фазы; $U_{\phi} = U_{\text{л}}/\sqrt{3}$ — фазное напряжение дуги; $U_{\text{л}}$ — напряжение печного трансформатора; r , x , x_p — соответственно активное и индуктивное сопротивление вторичной цепи и реактора.

Падение напряжения в приэлектродных областях дуги (a) изменяется в пределах от 9 до 30 В [3]. Градиент b по ходу электродуговой плавки изменяется значительно [3]:

- при расплавлении металлошхты $b \approx 10...12$ В/мм;
- при наличии шлака и жидкого расплава $b \approx 1,5...3,8$ В/мм;
- в окислительный и восстановительный периоды плавки $b \approx 0,7...1,1$ В/мм.

Это обстоятельство служит дополнительным доказательством целесообразности и необходимости оперативной коррекции энергетического режима путем оптимизации управления этим режимом.

Непосредственно контролировать текущее значение L_d практически невозможно. Поэтому оперативную коррекцию электрического режима ДСП в пределах установленной ступени напряжения возможно осуществлять путем изменения текущего значения тока дуги $I_d(\tau)$, определяющего текущее значение импеданса подводящей цепи $Z(\tau)$.

Расчетные зависимости $L_d(\tau) = f_2[I_d(\tau)]$ имеют нелинейный вид [3] и в основном определяются

напряжением, подводимым к электроду. Это дополнительно усложняет и одновременно делает актуальным решение задачи коррекции электрического режима путем оптимизации управления энергетическим режимом ДСП.

Коррекция энергетического режима электродуговой плавки возможна при использовании расчетного метода статической оптимизации управления, изложенного в работах [1, 2].

С использованием детерминированного статического принципа оптимизации управления фирмой "Энергосоюз" в 2004 г. на ДСП ОАО "Северсталь" внедрена система "НЕВА — ДСП".

Перспективным направлением решения задачи оптимизации управления энерготехнологическим процессом выплавки стали в ДСП является использование искусственных нейронных сетей (ИНС) в системах "SIMELT" фирмы "SIMENS" и IAF, разработанной фирмой "Neural Application Corporation" США [3].

Системы, основанные на использовании свойств ИНС, обладающие свойством адаптации, по своей сути являются экспериментально статистическими. Поэтому они не раскрывают физической сущности формирования управляющих воздействий, рассматривая оптимизируемый процесс как "черный ящик".

Для оптимизации управления энергетическим режимом ДСП целесообразно использовать поисковые методы динамической оптимизации управления с использованием систем автоматической оптимизации управления (САОУ).

Основные положения поисковых методов динамической оптимизации управления технологическими параметрами производственных процессов разработаны В. В. Казакевичем [4].

Отсутствие программируемых технических средств и наличие нежелательных автоколебательных предельных поисковых режимов работы известных САОУ были негативными факторами, сдерживающими эффективное использование таких систем.

Повышенная интеллектуальность САОУ при формировании управляющих воздействий определяется следующим фактором.

В широко используемых в настоящее время системах автоматической стабилизации заданных значений контролируемых параметров (например, импеданса в системе ArCOS) направление и значение управляющего воздействия (перемещения электрода) определяются принятым типовым, в пределах ПИД, законом управления и величиной и знаком отклонения текущего значения управляемого параметра от заданного значения.

В поисковой интеллектуальной динамической САОУ задается цель управления: определение и

поддержание экстремального (наилучшего в технологическом смысле) значения показателя эффективности оптимизируемого процесса.

Направление и значение управляющего воздействия формируется в САОУ по результату анализа отклика (реакции) оптимизируемого технологического процесса на текущее тестирующее (поисковое) воздействие.

Если изменение отклика оптимизируемого параметра происходит в желательном направлении, например, увеличивается при поиске максимальной величины, то выбранное направление управляющего воздействия считается правильным и повторяется в последующие моменты времени.

Если изменение реакции процесса происходит в нежелательном направлении, например, увеличивается при поиске минимального значения, то выбранное направление изменения управляющего воздействия считается ошибочным и в последующий момент времени должно быть изменено на противоположное, т. е. проведен реверс исполнительного механизма (ИМ).

Существуют различные динамические методы поиска экстремума инерционного с запаздыванием оптимизируемого технологического параметра производственного процесса [4].

Опытная проверка системы автоматической оптимизации энергетического режима ДСП на стенде

Для проверки работоспособности и исследования эффективности метода поисковой динамической оптимизации управления энергетическим режимом ДСП-180 был создан опытный лабораторный стенд, полностью физически реализующий управление энергетическим режимом одной фазы ДСП при функционировании САОУ.

В результате проведенного исследования было установлено, что для специфических условий электрического режима ДСП в качестве поискового метода динамической оптимизации можно использовать усовершенствованный шаговый (дискретный) режим с совмещением во времени поискового тестирующего и рабочего перемещения электрода и остановкой электрода в момент достижения $P_d(\tau)_{\max}$.

В этом случае целенаправленное перемещение электрода индивидуально каждой фазы для достижения максимального значения мощности, выделяемой в электрической дуге, $P_d(\tau)_{\max}$ в целях достижения максимально возможной часовой производительности ДСП $G(\tau)_{\max}$ осуществляется дискретно на определенную величину ΔI_d .

Поскольку значение $P_d(\tau) = P_a(\tau) - P_{\text{эл.п}}(\tau)$, где $P_a(\tau)$ — текущее значение активной мощности,

$P_{\text{эл.п}}(\tau) = I_d^2 r$ — мощность электрических потерь в каждой фазе, то для поддержания более устойчивого режима горения дуги можно в САОУ за счет электрического режима поддерживать значение $P_a(\tau)_{\max}$.

Дискретное изменение рабочего тока дуги ΔI_d определяется выражением

$$\Delta I_d = \sigma(\tau) K_{\text{ИМ}} \Delta \tau_{\text{и}},$$

где $\sigma(\tau) \in (+1; 0; -1)$ — сигнум(знаковая)-функция, определяющая текущее направление движения гидравлического ИМ, перемещающего электрод; $K_{\text{ИМ}}$ — постоянная скорость перемещения электрода в автоматическом режиме (от 80 до 120 мм/с); $\Delta \tau_{\text{и}}$ — продолжительность включения ИМ при заданном $\sigma(\tau)$ направлении движения электрода:

- при $\sigma(\tau) = +1$ движение электрода направлено вниз на увеличение значения тока дуги;
- при $\sigma(\tau) = -1$ движение электрода направлено вверх на уменьшение тока дуги;
- при $\sigma(\tau) = 0$ движение электрода не происходит в двух случаях: в течение паузы при шаговом режиме или при достижении $P_d(\tau)_{\max} \pm \Delta P_{\text{н}}$, т. е. оптимальных условий, где $\Delta P_{\text{н}}$ — зона нечувствительности, принятая в САОУ.

Шаговый режим работы САОУ энергетическим режимом ДСП реализуется в соответствии с условием

$$\Delta \tau_{\text{ц}} = \Delta \tau_{\text{и}} + \Delta \tau_{\text{п}},$$

где $\Delta \tau_{\text{ц}}$ — заданная продолжительность цикла шагового режима перемещения ИМ при работе системы; $\Delta \tau_{\text{п}}$ — продолжительность паузы (при $\sigma(\tau) = 0$) между отдельными шагами ИМ, причем должно соблюдаться соотношение $\Delta \tau_{\text{и}} \gg \Delta \tau_{\text{п}}$.

В САОУ дискретно в зависимости от достигнутого приращения значения оптимизируемого параметра ΔP_i на i -м шаге формируется значение функции $\sigma(\tau)_{i+1}$ на последующий $(i + 1)$ -й шаг в соответствии с условиями [5]:

- при $\Delta P_i > 0$ и если $\Delta P_i - \Delta P_{\max(i-1)} + \Delta P_{\text{н}} \geq 0$, то $\sigma(\tau)_{i+1} = \sigma(\tau)_i$;
- при $\Delta P_i > 0$ и если $\Delta P_i - \Delta P_{\max(i-1)} + \Delta P_{\text{н}} < 0$, то $\sigma(\tau)_{i+1} = 0$;
- при $\Delta P_i < 0$ и если $\Delta P_i + \Delta P_{\text{н}} < 0$, то $\sigma(\tau)_{i+1} = -\sigma(\tau)_i$.

Здесь ΔP — текущее приращение оптимизируемого параметра, полученное в результате i -го шага; $\Delta P_{\max(i-1)}$ — максимальное приращение оптимизируемого параметра, достигнутое на предыдущем $(i - 1)$ -м шаге; $\Delta P_{\text{н}}$ — принятая зона нечувствительности САОУ.

Запоминание $\Delta P_{\max(i-1)}$ в САОУ энергетическим режимом ДСП осуществляется в соответствии с условием:

- если $\Delta P_i > \Delta P_{i-1}$, то $\Delta P_{\max} = \Delta P_i$;
- если $\Delta P_i < \Delta P_{i-1}$, то $\Delta P_{\max} = \Delta P_{i-1}$.

Для предотвращения длительной остановки ИМ или перемещения электрода в выбранном направлении под действием технологических возмущений в САОУ предусмотрен принудительный реверс ИМ по истечении заданного интервала времени $\Delta \tau_B$.

При исследовании эффективности реального функционирования различных поисковых методов динамической оптимизации управления электрическим режимом ДСП на компьютеризированном стенде было принято следующее условие: исследуемый программно реализованный на персональном компьютере (ПЭВМ) режим работы САОУ должен обеспечивать выполнение всех необходимых операций по управлению электрическим режимом ДСП, включая процедуры зажигания дуги и ликвидацию технологического короткого замыкания и обрыва дуги, в автоматическом режиме самостоятельно.

Положительными свойствами поисковых САОУ электрическим режимом ДСП, обеспечивающими повышенную интеллектуальность управления, являются:

- отсутствие какой-либо предварительной информации о текущем виде и текущем положении статической характеристики в координатах "управ-

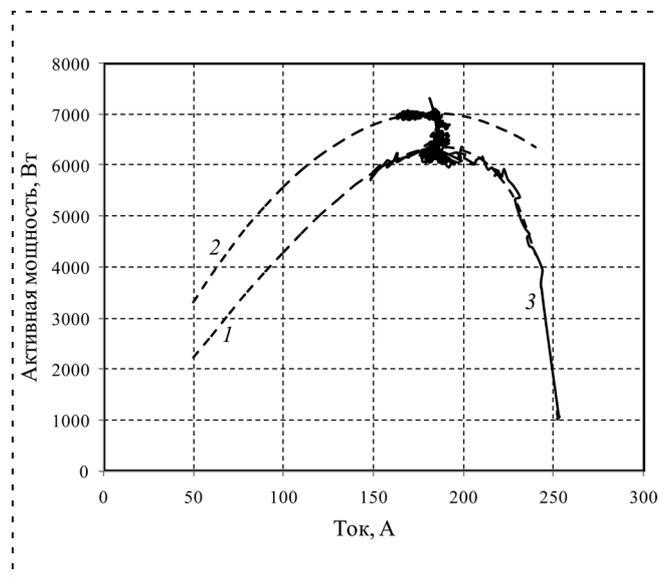


Рис. 3. Экспериментальная траектория поискового режима определения $P_a(\tau)_{\max}$ при функционировании САОУ электрическим режимом в координатах " $I_d(\tau) - P_a(\tau)$ " в процессе электродуговой плавки на опытном лабораторном стенде:

1 — статическая характеристика процесса в начале плавки; 2 — статическая характеристика в конце плавки; 3 — траектория поискового процесса $P_a[I_d(\tau)]$

ляющее воздействие $I_d(\tau)$ " — "оптимизируемый параметр $P_d(\tau)$, $P_a(\tau)$, $G(\tau)$ ";

- детерминированный (физически обоснованный) подход к формированию управляющего воздействия — перемещения электрода каждой фазы для выбранной ступени трансформатора.

Траектория поискового процесса и поддержания $P_a(\tau)_{\max}$ в процессе всей электродуговой плавки на компьютеризированном стенде в плоскости " $I_d(\tau) - P_a(\tau)$ " представлена на рис. 3.

Использование параметра $P_a(\tau)$ вместо $P_d(\tau)$ при исследовании режимов работы САОУ на компьютеризированном стенде с точки зрения реализации метода динамической оптимизации не имеет принципиального значения и определяется двумя факторами:

- более устойчивым режимом горения дуги при несколько большем токе дуги (короткой дуге) и предпочтительном отношении технологов к этому параметру [2];
- более доступного для прямого контроля текущего значения $P_a(\tau)$ по сравнению с расчетным значением $P_d(\tau)$.

Обеспечение максимально возможной производительности ДСП путем поддержания $P_a(\tau)_{\max}$ или $P_d(\tau)_{\max}$ одновременно способствует снижению удельного расхода дорогостоящей электроэнергии, а значит, и себестоимости выплавки стали.

Структура системы оптимального управления энергетическим режимом электродуговой плавки в ДСП-180

Зависимость общего количества электрической энергии и удельного количества электроэнергии, затраченного на выплавку тонны стали, от суточного производства ДСП-180 ЭСПЦ ОАО "ММК" приведена на рис. 4.

Представленная зависимость свидетельствует о правильности выбора в качестве критерия оптимизации управления электрическим режимом сверхмощных ДСП показателя максимальной производительности печи.

Электрический режим при выплавке стали в сверхмощных ДСП, особенно в начальный период расплавления металлошихты, совмещенный с заливкой чугуна, характеризуется неустойчивостью. Поэтому для обеспечения оперативности и эффективности управление энергетическим режимом сверхмощных ДСП-180 целесообразно осуществлять по двухконтурной схеме, включающей основной стабилизирующий контур и корректирующий контур.

В качестве основного стабилизирующего контура используется существующая система управле-

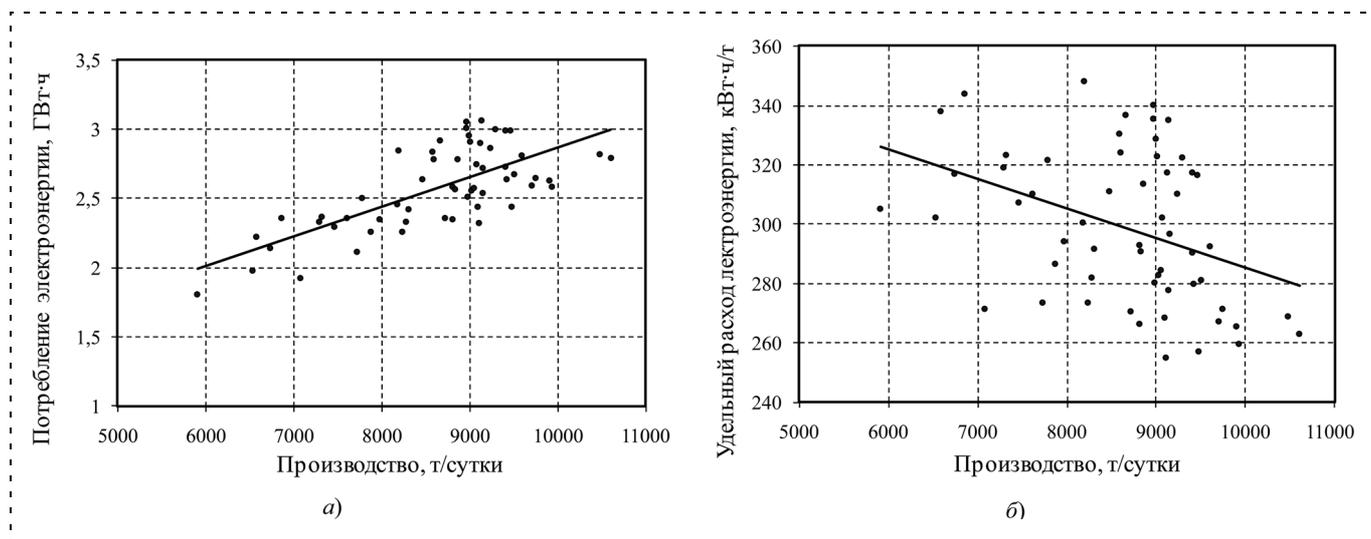


Рис. 4. Зависимость общего количества электрической энергии (а) и удельного количества электроэнергии (б), затраченного на выплавку тонны стали, от суточного производства ДСП-180 ЭСПЦ ОАО "ММК"

ния ArCOS, обеспечивающая выполнение следующих функций:

- переключение ступеней напряжения по ходу электроплавки;
- зажигание дуги;
- ликвидацию технологических коротких замыканий;
- перемещение электрода в рабочую зону путем стабилизации программно заданного значения импеданса (тока дуги).

Учитывая жесткие контрактные условия, накладываемые на режим эксплуатации ArCOS, реализацию корректирующего контура целесообразно осуществить с использованием дополнительного отечественного (КР-300) или импортного (SIEMENS S7-400) контроллеров.

Упрощенная структурная схема предлагаемого метода коррекции энергетического режима электродуговой плавки в ДСП-180 приведена на рис. 5.

Информационные сигналы о текущих значениях тока $I(\tau)$ и напряжения $U(\tau)$ с измерительных трансформаторов одновременно подаются в систему управления электродами ArCOS, в блок расчета мощности дуги и в блок управления БУ.

Система управления электродами ArCOS выводит электрический режим в зону рекомендуемых [3] рабочих токов или программно заданных значений импеданса, приблизительно соответствующую среднему значению мощности в пределах текущего шага программы.

Наличие синфазно работающих ключей K_1 и K_3 при необходимости позволяет полностью исключить влияние динамической коррекции и обеспечивает переход на существующий программный режим энергопотребления ДСП.

В блоке расчета мощности дуги вычисляются значения $P_a(\tau)$ и $P_d(\tau)$. Для подавления высокочастотной составляющей сигналов, пропорциональных $P_a(\tau)$ или $P_d(\tau)$, используется фильтр.

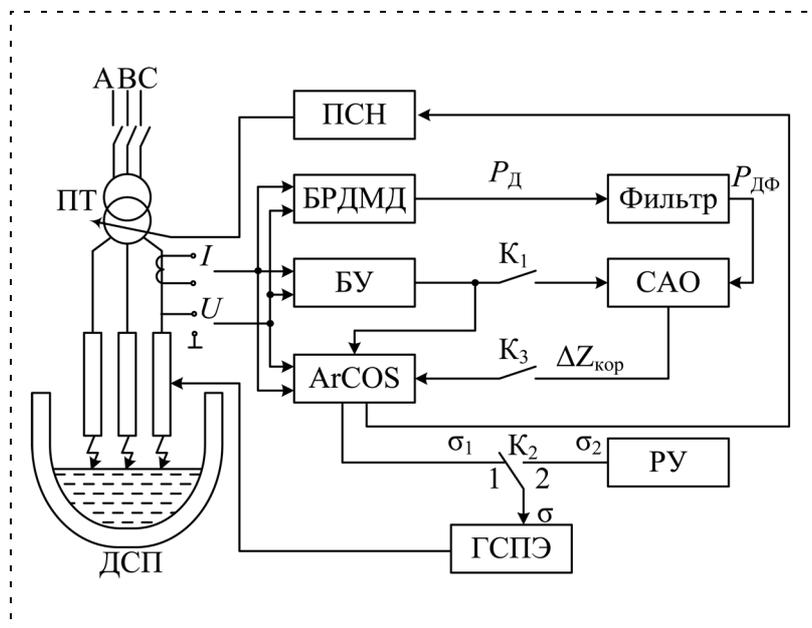


Рис. 5. Структурная схема реализации алгоритма оптимизации энергетического режима электродуговой плавки в ДСП-180:

ДСП — дуговая сталеплавильная печь; ПТ — печной трансформатор; ПСН — переключатель ступеней напряжения; АрСОС — система управления перемещением электродов и переключением ступеней напряжения; БУ — блок управления; САО — система автоматической оптимизации управления; K_1 , K_2 , K_3 — ключи выбора режима работы; РУ — узел ручного управления

Информация о значении $P_d(\tau)$ подается в САОУ, реализующую принятый метод динамической коррекции программно заданного режима энергопотребления путем определения и поддержания $P_d(\tau)_{\max}$ или $P_a(\tau)_{\max}$.

В блоке управления БУ реализована функция "флага включения коррекции", которая определяет режим управления ключами K_1 и K_3 .

При включении ДСП значение функции "флага коррекции" равно "0". При этом ключи K_1 и K_3 находятся в разомкнутом состоянии (работа САОУ запрещена). Ключ K_2 находится в положении 1. Управление системой перемещения электрода фазы осуществляет система ArCOS в автоматическом режиме. При достижении тока дуги, заданного значением импеданса для выбранной ступени напряжения ПТ, функция "флаг включения коррекции" принимает значение "1". Это означает разрешение функционирования САОУ путем одновременного включения ключей K_1 и K_3 .

При этом ключ K_1 включает в работу оптимизирующий алгоритм управления (ОАУ), а ключ K_3 позволяет учитывать системе ArCOS корректирующую поправку $\Delta Z_{\text{кор}}$ при управлении электрогидравлической системой управления перемещением электродов.

В момент возникновения производственной ситуации, когда нецелесообразно проведение коррекции (обрыв дуги или технологическое короткое за-

мыкание), функция "флаг включения коррекции" принимает значение "0". При этом управление движением электродов осуществляет система ArCOS, которая после вывода режима на заданное значение импеданса (силы тока) снова разрешает работу САОУ.

Ключ K_2 определяет режим управления перемещением электродов: автоматический — в положении 1, дистанционный от блока РУ (ручное управление) — в положении 2.

Заключение

По данным [3] использование систем автоматической оптимизации управления энергетическим режимом ДСП позволяет получить годовой экономический эффект от 1,2 до 2,5 млн руб. за счет увеличения производительности ДСП на 1,7 % и снижения затрат электрической энергии на 2...2,4 %.

Список литературы

1. **Ефроймович Е. Ю.** Оптимальные электрические режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1956. 192 с.
2. **Марков Н. А.** Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок. М.: Энергия, 1975. 208 с.
3. **Лапшин И. В.** Автоматизация технологических процессов дуговой сталеплавильной печи. М.: ООО Квадратум, 2002. 157 с.
4. **Казакевич В. В., Родов А. Б.** Системы автоматической оптимизации. М.: Энергия, 1977. 288 с.
5. **Парсункин Б. Н., Бушманова М. В.** Расчеты переходных процессов в системах экстремального регулирования с запоминанием экстремума. Учеб. пособ. Магнитогорск: МГТУ, 2001. 164 с.

УДК 62-5:621.357.67

В. Ф. Коростелев¹, д-р техн. наук, проф.,
Л. П. Хромова², канд. техн. наук, директор,
А. Н. Рассказчиков¹, аспирант

¹ Владимирский государственный университет

² НПЦ "ИНОР", г. Королев
rasskazchikov@list.ru

Управление процессом кристаллизации сплава В95

Представлены результаты исследований кристаллизации высокопрочного алюминиевого сплава В95 в условиях наложения давления 400 МПа. Установлено, что сжимаемость кристаллизующегося металла может достигать 12,4 %. Благодаря управлению параметрами процесса достигнуто квазитвердое состояние до начала кристаллизации, уплотнение дендритных ячеек и легкоплавкой эвтектики во время кристаллизации. При равной прочности с деформированным металлом литой сплав В95 в заготовке размерами $\varnothing 90 \times 180$ мм имеет в 1,2 раза более высокий предел текучести.

Ключевые слова: объект со скрытыми свойствами, упругость, сжимаемость, широтно-импульсная модуляция, система управления.

Успехи, достигнутые в области наноиндустрии при решении проблемы улучшения комплекса свойств металлов, основаны на более эффективной организации межатомных и электронных взаимодействий по сравнению с традиционными металлургическими технологиями.

В то же время сам процесс приготовления наночастиц — сложный и трудоемкий, а возможности изготовления реальных заготовок и изделий — весьма ограниченные.

Предлагается для формирования плотноупакованных фрагментов наноструктур накладывать давление на металл до начала кристаллизации.

С учетом того, что уровень давления, применяемого в процессах жидкой штамповки и литья под давлением, составляет не более 300 МПа, на данном этапе исследований параметры применяемого оборудования и технологической оснастки были выбраны из условия повышения давления до 400 МПа.

Методика исследования процесса

Схема заливки формы металлом и наложения давления с помощью пресующих плунжеров приведена на рис. 1, а на рис. 2 показано расположение датчиков параметров исследуемого процесса.

Как видно на рис. 1, правый плунжер 8 перекрывает заливочное отверстие 10, после чего в работу включается левый плунжер 2. Если давление накладывать достаточно быстро, то при определенном перегреве металла можно перевести расплав в состояние всестороннего сжатия, а далее после кристаллизации и охлаждения можно изучить, как процесс наложения давления влияет на формирование структуры и свойств металла.

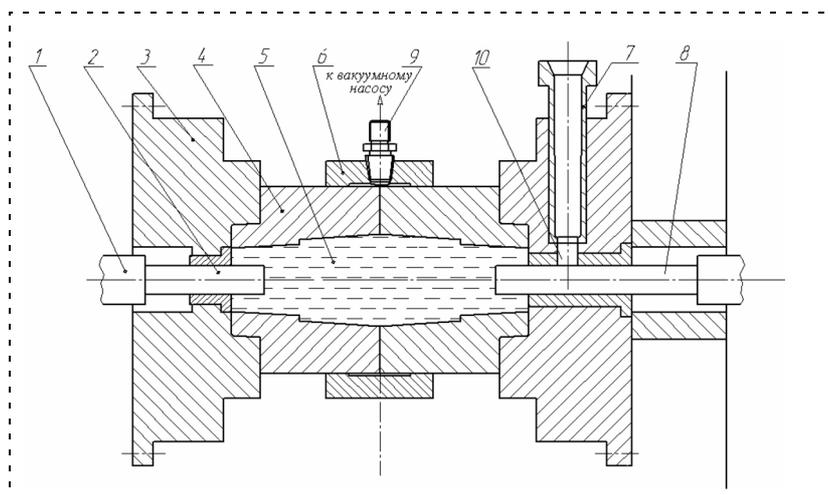


Рис. 1. Схема процесса:

1 — шток гидроцилиндра; 2 — плунжер пресующий левый; 3 — основание; 4 — матрица; 5 — полость формы, заполненная жидким металлом; 6 — кольцо; 7 — чаша заливная; 8 — плунжер пресующий правый; 9 — штуцер вакуумной системы; 10 — заливочное отверстие

Анализ результатов исследований

Уже на этапе предварительных исследований было отмечено, что при опрессовке массивных отливок на компенсацию их усадки требуется дополнительный объем ~10 % от общего объема [1].

Осциллографирование перемещения плунжеров, изменения давления в гидросистеме, изменения усилия запирания формы позволили уточнить значение сжимаемости жидкого металла и установить важные кинетические закономерности.

Характерный вид осциллограммы представлен на рис. 3 (см. вторую сторону обложки). Фактические изменения значений измеряемых параметров показаны на рис. 4.

На осциллограмме (см. рис. 3) шлейф в виде пилообразной линии от отметки -2 слева до отметки 4 дает информацию о движении плунжера 1 справа

налево. Масштаб по оси времени — 0,01 с, т. е. цифре 1000 соответствует отрезок времени 10 с. Видно, что в течение примерно 8 с первый плунжер вначале очень быстро, затем с замедлением входит внутрь отливки и далее остается в неизменном положении, так как соответствующий поршень гидроцилиндра доходит до упора. Ход плунжера 1 составляет 150 мм. Через 8 с в работу включается плунжер 2 (сплошная черная линия), который вначале быстро, а затем по экспоненте во времени, примерно до 72 с опрессовывает жидкий металл, его ход составляет 125 мм.

Светлой линией от отметки примерно 0,5 показано изменение давления рабочей жидкости в гидросистеме от 0 до 10 МПа. Видно, что во время включения гидропривода плунжера протекает переходный процесс — давление падает, затем

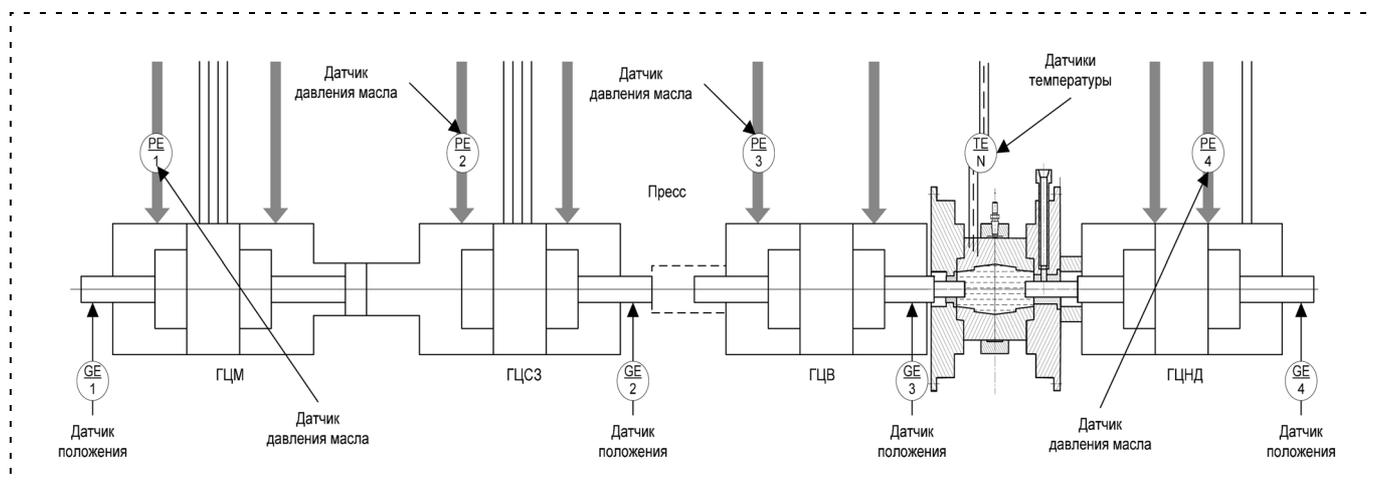


Рис. 2. Схема расположения датчиков

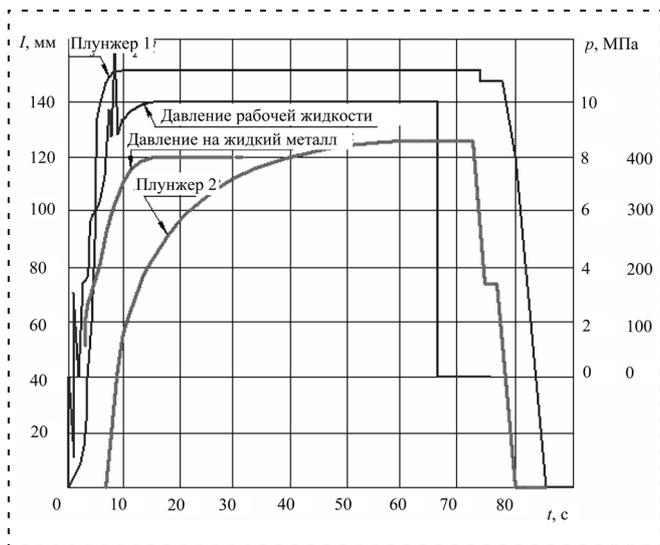


Рис. 4. Результаты обработки осциллограммы

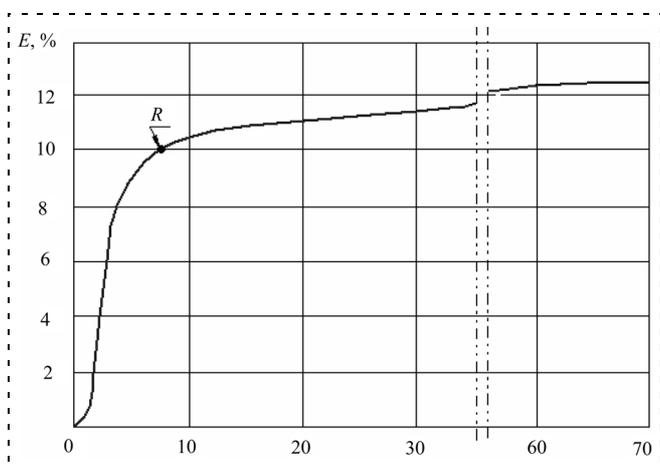


Рис. 5. Изменение сжимаемости по ходу процесса

в режиме колебаний его значение постоянно нарастает.

Наконец, в левом верхнем углу светлой такой же линией показано изменение положения поршня-мультипликатора. Во время снижения давления мультипликатор отходит назад, при этом усилие на подвижную плиту не более 0,3 МН, но когда давление в гидросистеме достигает 10 МПа, это усилие возрастает до 3 МН. Если давление на жидкий металл в момент отхода мультипликатора будет больше 40 МПа, может произойти раскрытие формы и выплеск металла по плоскости смыкания матриц. Такой режим работы недопустим, поэтому плунжеры 1 и 2 включаются в работу поочередно с интервалом 8 с. В правой части осциллограммы показано движение плунжеров и мультипликатора в исходное положение.

В таблице приведены числовые значения параметров в фиксированные моменты времени.

График изменения сжимаемости металла приведен на рис. 5, из которого следует, что в первые 8...10 с жидкий металл, не оказывая заметного сопротивления, сжимается до точки R (~10 %), а далее следует фаза медленного изменения объема в течение 80...100 с.

Установленная закономерность существенно расширяет представления о поведении жидкого металла в условиях наложения статического давления, но не в полной мере раскрывает его свойства как объекта управления (ОУ). Для создания эффективной системы управления наложением давления необходимо определить также значения параметров, которые определяют свойства объекта. Таки-

Данные для расчета коэффициента сжимаемости жидкого металла

№ п/п	Время, с	Ход плунжеров, мм		Давление, МПа		Объем запрессованного металла, см ³	Коэффициент сжимаемости, %
		1	2	Рабочей жидкости	В жидком металле		
1	1	3	0	—	—	2,4	0,13
2	2	9	0	—	—	7,3	0,40
3	3	20	0	3	50	16,2	0,90
4	4	50	0	4	150	40,5	2,25
5	5	80	0	6	200	64,8	3,55
6	6	140	0	6,5	250	113,4	6,25
7	7	150	0	9	300	120,15	6,60
8	8	150	0	9,5	320	120,15	6,60
9	9	150	40	9	340	152,5	8,40
10	10	150	55	9,3	350	164,6	9,10
11	12	150	65	9,6	370	172,7	9,50
12	15	150	85	10	400	188,9	10,40
13	20	150	95	10	400	197,0	10,90
14	25	150	106	10	400	206	11,2
15	30	150	112	10	400	211	11,7
16	35	150	115	10	400	213	11,8
17	40	150	120	10	400	218	12,1
18	50	150	122	10	400	220	12,3
19	60	150	124	10	400	222	12,4
20	70	150	125	10	400	223	12,4

ми параметрами являются значения удельных тепловых потоков, значения градиентов температурных полей, уровень энергии межатомных взаимодействий и др.

Скрытые свойства объекта управления

Названные параметры не поддаются непосредственному измерению, а теоретическая база аналитических расчетов не создана. Поэтому разрабатываемая система управления с полным правом может быть отнесена к классу систем позиционного управления со скрытыми свойствами [2]. В данном случае таким скрытым свойством является "сжимаемость" жидкого металла, описываемая экспоненциальной зависимостью с точкой перегиба, характеризующей переход из состояния относительно быстрой сжимаемости на величину $\sim 10\%$ в состояние замедленной сжимаемости под давлением не менее 400 МПа на величину $\sim 2,5\%$.

Предположительно такое поведение можно представить, используя модель "жестких сфер" [3], согласно которой в данном объеме можно разместить некоторое число сфер. Когда все сферы сжаты внешним давлением и находятся в состоянии контакта, дальнейшее увеличение давления может не привести к увеличению числа размещаемых атомов. Таким образом, модель "жестких сфер" объясняет наличие предела сжимаемости, но не раскрывает наличие точки перегиба.

Возможно, межатомные взаимодействия в жидком металле имеют более сложный характер, поэтому представления о модели необходимо расширить.

В следующей серии экспериментов было обращено внимание на поведение металла при быстром сбросе давления. Если сжимаемость связана исключительно с заполнением пустот, то после снятия давления ни о каком возврате к первоначальному объему не может быть речи.

На осциллограмме, представленной на рис. 6 (см. вторую сторону обложки), видно, что в момент отключения давления в гидросистеме оба прессующих плунжера отходят назад, а при повторном включении они быстро занимают прежние позиции, так что общий характер кривой несущественно отличается от графика движения при непрерывной подаче давления. Усилие, необходимое для возвращения плунжеров, с учетом трения и схватывания с твердым металлом может достигать 15...20 кН. Следовательно, уже на ранних стадиях опрессовки между атомами накапливается упругая энергия, а в момент отключения давления металл ведет себя как сжатая пружина, отталкивающая прессующие плунжеры.

Дополним модель сфер представлением об упругом поведении этих сфер. Заметим, что наложение

давления в режиме импульсной модуляции (период 10 с, отключение 1 с) показывает, что со временем "упругое последствие" сжатого металла уменьшается, и оно исчезает полностью, когда экспонента сжимаемости достигает максимального значения.

Природа упругих сил в жидком металле может быть связана с наличием газов, растворенных в металле, но это лишь одна из составляющих, причем незначительная. В точке R сжимаемость металла достигает 10 %, давление 400 МПа, отсюда модуль упругости жидкого металла $E = 4$ ГПа.

Упругость — важное свойство ОУ, определяющее возможность распространения энергии в объеме на требуемом удалении от прессующего плунжера, а также равномерного сближения и уплотнения атомов.

В то же время сравнение поведения правого и левого плунжеров показывает, что их реакция на сброс давления неодинаковая. Правый плунжер, который включен первым и к моменту включения левого остановился, проявляет рефлексы меньшей амплитуды, а угасание рефлексов происходит уже после третьего импульса. Это наводит на предположение, что энергия в объеме, прилегающем к одному из плунжеров, отличается по величине от энергии в объеме, контролируемом другим плунжером. Отсюда следующее свойство ОУ — разный уровень удельной, т. е. отнесенной к единице объема, энергии. Различие в уровнях удельных энергий, накопленных при наложении давления, можно связать с несимметричным распределением температурных полей, с образованием агрегатов и атомных кластеров, заклинивающих распространение металла из одних зон в другие.

Заслуживает также внимания постепенное от цикла к циклу уменьшение амплитуды "отскоков" плунжеров, что, по нашему мнению, может быть связано с развитием кристаллизации и уменьшением уровня накопленной энергии упругого сжатия атомов. Перефразируя, можно сказать, что при данном давлении уровень упругой энергии пропорционален объему жидкости.

Становится понятным, почему в свое время А. К. Белопухов по поводу проблемы повышения плотности отливок при литье под давлением высказал мнение, что локальная подпрессовка не является радикальным средством, и при этом указал на необходимость согласования наложения давления с гидродинамическими и термодинамическими режимами заполнения формы [4].

В рассматриваемом случае исследования проведены на модельных отливках; заполнение формы происходит свободной заливкой, влияние турбулентности сведено к минимуму. Что же касается

динамики тепловых процессов и ее влияния на проявления свойств ОУ, то для движения в этом направлении в работе [5] нами предложен экспериментально-аналитический метод и соответствующая математическая модель для оценки состояния ОУ на разных этапах формирования его структуры и свойств.

Моделирование тепловых процессов

В результате моделирования выявлены закономерности, проливающие свет на ряд других свойств ОУ, качественным образом изменяющие традиционные представления о составе и структуре применяемых материалов, о температурных режимах и временных интервалах наложения давления, о структуре системы автоматического управления.

Графически результаты моделирования представлены на рис. 7. Правая часть — это стенка формы. Здесь приведены экспериментальные зависимости, которые в расчетах температурных полей в отливке использованы в качестве описания граничных условий. Соответственно, слева для различных моментов времени приведено распределение температур в стенке отливки.

В процессе моделирования варьировали степень перегрева расплава и начальную температуру формы.

Установлено, что в условиях наложения давления, когда между залитым металлом и формой устанавливается достаточно плотный (без зазора) тепловой контакт, интенсивность теплообмена существенно возрастает, и уже в первые секунды на поверхности металла образуется корка, а приконтактные слои формы нагреваются до высокой температуры.

Для того чтобы сформировать равномерную по всему объему структуру, как показано в работе [6], необходимо накладывать давление при отсутствии теплообмена.

Повышение начальной температуры формы и увеличение степени перегрева расплава привело к тому, что образующаяся в первые моменты времени после заливки корка за счет притока тепла изнутри расплавляется. Это дает возможность поднять давление и опрессовать металл непосредственно у поверхности контакта с формой. Таким образом, установлено, что необходимая для наложения давления на жидкий металл температура формы $t_{\phi} = 220^{\circ}\text{C}$, а температура заливаемого металла $t_3 = 850^{\circ}\text{C}$.

Уместно отметить, что попытки измерить температуру внутри отливки не дали результатов, потому что зачехленный спай проявляет запаздывание, а открытый спай подвержен влиянию механических сил от движения металла и проникновению металла вдоль электродов.

Формирование микроструктуры

Исследование микроструктуры полученных модельных отливок показало, что главная цель наложения давления — сформировать плотную равномерную во всем объеме структуру — может быть достигнута при выполнении дополнительных условий.

Как видно из рис. 8 (см. вторую сторону обложки), микроструктура литого сплава В95 существенно приближена к микроструктуре того же сплава в деформированном состоянии [7].

При достигнутом уровне давления механизм кристаллизации не изменяется. Аморфное или квазикристаллическое состояние, равно как нанокристаллическое, не зафиксировано. Из расплава выделяется α -твердый раствор, а на границу вытесняется легкоплавкая эвтектика. При высокой степени легированности сплава В95 можно предположить, что температура плавления эвтектики $t_9^{\text{III}} \approx 590...600^{\circ}\text{C}$.

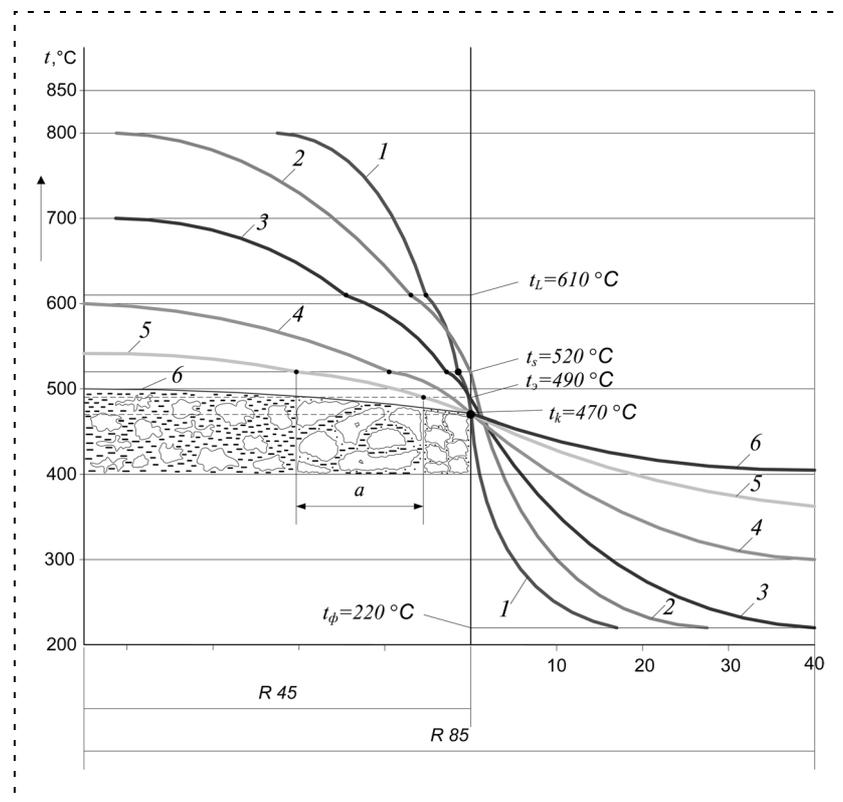


Рис. 7. Распределение температуры в форме и отливке: 1 — 4 с; 2 — 8 с; 3 — 12 с; 4 — 20 с; 5 — 50 с; 6 — 80 с

Эта температура, как видно на рис. 7, близка к температуре контакта t_k .

Отсюда можно представить крайний случай, когда по оси отливки температура достигла равновесного солидуса, т. е. в основной массе металл закристаллизовался и давление отсутствует, по границам зерен остается эвтектика, которая кристаллизуется, но уже без влияния давления.

Такая кристаллизация может привести к проявлению усадки, к разрыхлению металла, к потере прочностных и пластических свойств. Поэтому температуру на поверхности контакта поддерживали на уровне $t_3^{пл} - t_k = 10...20$ К, что обеспечивало направленное движение кристаллов эвтектики от периферии к центру.

Присутствие эвтектики в кристаллизующемся расплаве может дать и положительный эффект.

Дело в том, что переход металла из жидкого в твердое состояние сопровождается не только чисто термическим уменьшением объема, связанным с охлаждением, но и аномальным уменьшением объема в момент перехода атомов из жидкого состояния в кристаллическое. По разным данным, усадка при этом может составлять 0,3...0,5 %. И если эвтектика, как показано на рис. 7, обволакивает зерна α -твердого раствора и образует, таким образом, систему сообщающихся каналов, то при наложении давления со стороны незакристаллизовавшегося объема расплава предоставляется возможность продавливать металл не только в двухфазную зону, но и значительно глубже на расстояние a (рис. 7) и компенсировать усадку там, где в обычных условиях ее компенсировать невозможно.

Синтез системы управления процессом

Следует заметить, что управление данным объектом со скрытыми свойствами, возможно, связано с созданием системы управления с переменной структурой. Дело в том, что формирование требуемого кристаллического строения происходит последовательно от поверхности контакта с формой вглубь к оси отливки, и при этом параметры температурных полей и давления во времени и в пространстве могут изменяться по разным траекториям. Из множества возможных сочетаний необходимо выбрать такой вариант, который обеспечивает достижение целей управления, в данном случае, улучшение свойств металлопродукции. Это возможно за счет наложения определенных ограничений, использо-

вания принципов терминального, адаптивного, интеллектуального управления.

Прежде всего, важно обратить внимание на такие этапы управления, как:

- тепловое взаимодействие залитого металла с поверхностью формы от начала контакта до достижения температуры контакта, включая и время расплавления корки кристаллов, — фазу 1;
- опрессовку жидкого металла — фазу 2;
- выдержку для снижения температуры контакта — фазу 3;
- повышение давления и продавливание металла для компенсации усадки легкоплавкой эвтектики — фазу 4.

В фазе 1 контролируемым параметром может быть температура контакта, контролируемым и управляемым — давление на жидкий металл, причем для уменьшения давления может быть использована частотно- или широтно-импульсная модуляция. Во 2-й фазе контролируемым и управляемым параметром может быть сжимаемость жидкого металла. В 3-й фазе отслеживается отрезок времени для снижения температуры контакта до необходимого уровня. В 4-й фазе, как и во 2-й, контролируемым и управляемым параметром выступает сжимаемость жидкого металла.

Для каждой из названных фаз разработан алгоритм управления, в среде Borland C++ написан супервизор и отдельные подпрограммы.

Схематически компьютерная система управления приведена на рис. 9.

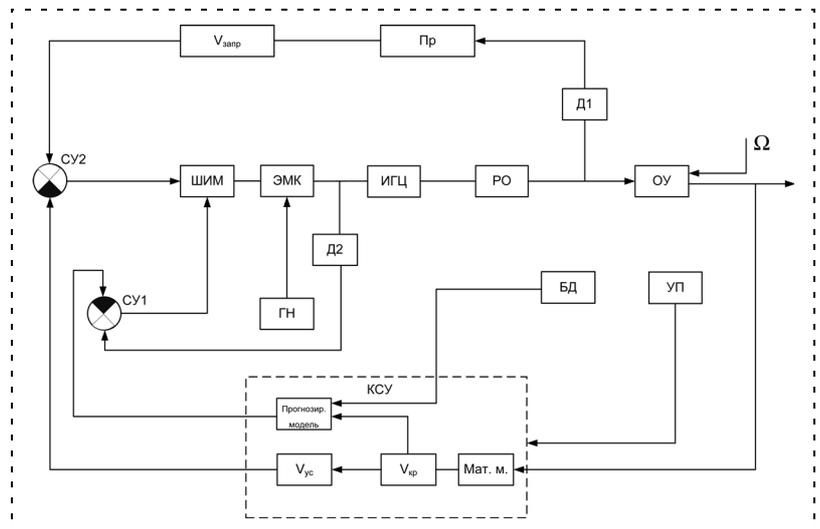


Рис. 9. Структурная схема системы управления: ОУ — объект управления; УП — управляющая программа; Ω — внешние возмущения; РО — рабочий орган; ИГЦ — исполнительный гидроцилиндр; ЭМК — электромагнитный клапан; ШИМ — широтно-импульсный модулятор; СУ — сравнивающее устройство; КСУ — компьютерная система управления; ГН — гидронасос; Пр — преобразователь; БД — база данных; Мат. м. — математическая модель; V_{yc} — объем усадки кристаллизующегося металла; $V_{зпр}$ — объем запрессованного металла; Д1 — датчик перемещения плунжеров; Д2 — датчик давления в гидросистеме

В соответствии со структурной схемой на рис. 9 в качестве ОУ выступает процесс наложения давления на жидкий металл. Информативным параметром может быть удельный тепловой поток q на границе "отливка—форма", фиксируемый экспериментально с помощью термопар, установленных в стенке формы на разном удалении от рабочей поверхности. Зависимость q от времени используется для описания граничных условий, которые наряду с дифференциальными уравнениями теплопроводности для твердой, двухфазной и жидкой зон отливки представляют собой математическую модель (Мат. м.) тепловых процессов.

Разработано программное обеспечение для расчета в автоматическом режиме скорости кристаллизации, объема закристаллизовавшегося металла $V_{кр}$ за фиксированный отрезок времени, а также $V_{ус} = \varepsilon V_{кр}$, где ε — коэффициент сжимаемости металла в процессе кристаллизации. По команде УП за тот же отрезок времени с помощью датчиков перемещения плунжеров Д1 и Пр рассчитывается $V_{запр}$.

Из БД КСУ определяет значение давления в гидросистеме, необходимого для опрессовки жидкого металла на основании ранее установленной зависимости $p_1 = f(V_{кр})$, а с помощью Д2 измеряется фактическое давление p_2 в гидросистеме. Разность давлений ($p_1 - p_2$) используется в коррекции параметров ШИМ; сюда же подается разность ($V_{запр} - V_{ус}$). В режиме разделения времени КСУ поочередно осуществляет коррекцию параметров ШИМ по сигналам от СУ1 и СУ2, поддерживая требуемый закон наложения давления, согласованный со скоростью кристаллизации.

Использование данной системы управления позволяет изучить свойства объекта, скорректировать управляющую программу, получить важную для создания базы данных информацию.

Результаты испытаний литого сплава В95

Как следует из рис. 10, на модельных отливках из сплава В95 достигнуто повышение предела текучести на ~20 % по сравнению с тем же сплавом в деформированном состоянии.

Повышение предела текучести может быть связано с состоянием границ зерен. За счет наложения давления в литом материале такие дефекты, как высокоугловые границы, вакансии, стоки дислокаций оказываются заполненными атомами по каналам легкоплавкой эвтектики. Что же касается формирования прочности и пластичности, то, в отличие от обычной закалки и старения, требуется кор-

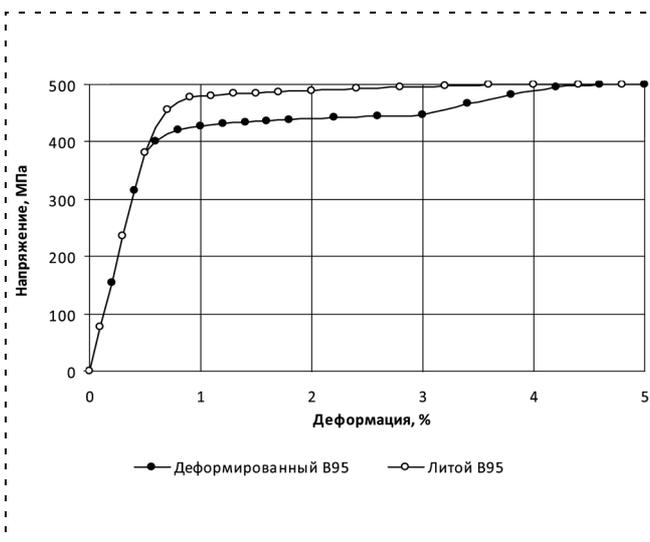


Рис. 10. Предел текучести сплава В95

ректировка температуры и времени выдержки во время старения.

В заключение следует сказать, что управление формированием структуры путем целенаправленного воздействия на механизм компенсации усадки создает предпосылки для развития металлургических мини-производств. Малотоннажное производство изделий и заготовок с более высоким уровнем свойств может составить достойную конкуренцию как традиционным, так и вновь разрабатываемым технологиям.

Список литературы

1. Коростелев В. Ф., Щелоков М. Е., Игошин А. В., Гришин Н. Н. Программно-корректируемое управление наложением давления при литье автомобильных дисков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 10. С. 8—14.
2. Ягодкин Ю. Д., Свиридова Т. А. Атомное строение фаз. М.: МИСиС, 2007. 107 с.
3. Затонский А. В. Теоретические основы позиционного управления системами со скрытыми свойствами: Дисс. ... д-ра техн. наук. Владимир. 2009 г. 285 с.
4. Белоухов А. К. Литье под давлением. Инженерная монография. М.: Машиностроение, 1975. 338 с.
5. Коростелев В. Ф., Рассказчиков А. Н., Мартынов И. Е. Алгоритмическое и программное обеспечение системы управления процессом литья с наложением давления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 1. С. 35—42.
6. Коростелев В. Ф. Технология и управление формированием нанокристаллического строения изделий из прецизионных сплавов. Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10. С. 14—17.
7. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: МИСиС, 1999. 416 с.

Ю. М. Ануров, д-р техн. наук, Ген. конструктор,
А. Д. Пушкарев, канд. техн. наук, специалист,
А. Б. Купцов, канд. техн. наук, специалист,
М. М. Максютин, специалист,
 Компания "Энергомаш (ЮК) Лимитед"
 maxiytin_maxim@energomash.ru

Синергетическое управление турбогенератором с бесщеточной системой возбуждения

Рассматриваются вопросы современных методов управления турбогенератором с бесщеточной системой возбуждения. Синтезированы алгоритмы управления и уравнения нелинейного наблюдателя состояния турбогенератора в рамках синергетической теории управления.

Ключевые слова: турбогенератор, система автоматического управления, система возбуждения, регулятор, наблюдатель, синергетика.

Последние результаты общей теории развития и, в частности, синергетики позволяют надеяться, что теория управления, как и другие науки, способна пойти путем естественности в целях перехода на новые концептуальные основы, отличающиеся от классических новыми подходами к построению алгоритмов управления. При синергетическом синтезе законов управления учитывается внутреннее кооперативное взаимодействие физических процессов и явлений. Это позволяет существенно продвинуться в решении поставленной А. А. Красовским [1] фундаментальной прикладной проблемы поиска общих объективных законов управления.

В практических приложениях синергетической теории управления к задачам управления энергетическим оборудованием перспективным является подход, при котором газотурбинный привод и турбогенератор рассматривают как единый объект управления, что позволяет согласованно управлять режимами турбогенератора и турбины. Газотурбинный энергоблок, включающий в себя газотурбинный привод и турбогенератор, характеризуется многомерностью, обладает существенными нелинейностями, а также динамическими связями не только между составляющими энергоблока — турбиной и синхронной электрической машиной, но и между группой генераторов, работающих в составе станции. В этих условиях применение классических линейных регуляторов негативно сказывается на таких важных характеристиках, как устойчивость системы, качество производимой электроэнергии, и на экономической составляющей, которую можно сопоставить с рациональным, минимально возможным

в данной ситуации, расходом топлива. Линеаризованные математические модели объекта управления адекватны лишь в небольшой области около рабочей точки, а это существенно усложняет задачу управления в условиях больших или пиковых нагрузок и может привести к серьезным авариям всей энергосистемы.

В синергетической теории управления предполагается формирование набора инвариантов, которые зависят от поставленных целей и входят в структуру аттрактора, обеспечивая тем самым выполнение системой требуемых технических задач при движении вдоль аттрактора. Задачей синтеза является поиск законов, при которых обеспечивается выполнение заданных инвариантов [2, 3].

При аналитическом синтезе законов управления задается функционал качества. Однако часто при решении прикладных задач наиболее важным является обеспечение желаемого протекания переходных процессов. С этой точки зрения функционал качества становится вспомогательным средством, помогающим формализовать процедуру синтеза законов управления.

Для объектов вида

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + \varphi(x(t))u(t) \quad (1)$$

в [3] предложен критерий качества на основе обобщенного интегрального функционала

$$J = \int_0^{\infty} F(\Psi, \dot{\Psi}) dt. \quad (2)$$

В общем случае функция $\Psi(x)$ представляет собой систему нелинейных функций, зависящих от переменных состояния и управления. Выбор $\Psi(x)$ предопределяет динамические свойства синтезируемой системы. Многообразие $\Psi(x) = 0$ можно интерпретировать как целевое с той точки зрения, что на нем управление $U(x)$ минимизирует функционал (2).

В простом случае подсемейство устойчивых экстремалей определяется уравнением

$$T\dot{\Psi} + \Psi = 0. \quad (3)$$

Алгоритм синтеза регулятора для нелинейного объекта управления порядка n можно представить в виде следующей последовательности действий:

1. Для выбранного функционала качества формируется функция $\Psi(x)$ в виде $\Psi(x) = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varphi(x_1 \dots x_{n-1})$, где β_i — настроечные параметры.

2. Ищутся частные производные $\frac{\partial \Psi(x)}{\partial x_i}$ и подставляются в (3), откуда, с учетом (1), находится закон управления $U(x)$.

3. Выбором настроечных параметров β_i и вида произвольной функции $\varphi(x_1, \dots, x_n)$ движению вектора координат объекта вдоль притягивающего многообразия $\Psi(x) = 0$ можно придать желаемый характер.

Сложность в реализации такого подхода заключается в том, что управление осуществляется по вектору состояния системы, что подразумевает наличие данных о переменных состояния объекта. Однако на практике в математическом описании объекта управления часто встречаются переменные, которые либо имеют абстрактную природу, фактически не являясь аналогами реальных сигналов в системе, либо не могут быть измерены. Измеряемые же переменные в большинстве случаев относятся ко входным и выходным координатам. Возмущения, действующие на объект, также чаще всего не поддаются измерениям.

Поэтому для решения задачи управления в систему вводится нелинейный наблюдатель состояния (ННС) — подсистема оценки значений ненаблюдаемых переменных. Синтез ННС состоит из двух этапов. На первом этапе формируется вектор управления исходя из предположения, что все переменные состояния объекта известны, т. е. могут быть измерены. На втором этапе ищется наблюдатель для ненаблюдаемых переменных состояния и возмущений, которые нельзя измерить. Нелинейный наблюдатель должен обеспечить асимптотическую сходимость вектора неизмеряемых параметров и его оценки.

Рассмотрим применение методик синергетической теории управления для синтеза законов управления турбогенератором, состоящего из синхронной машины (СМ) и бесщеточного возбудителя, широко применяемого в современных энергетических системах.

Система уравнений, описывающая работу турбогенератора на автономную нагрузку, имеет следующий вид:

$$u_d = -i_q x_q \frac{\omega}{\omega_0};$$

$$u_q = E'_q + i_d x'_d \frac{\omega}{\omega_0};$$

$$i_d = \frac{1}{r_H} \left(u_d - i_q x_H \frac{\omega}{\omega_0} \right);$$

$$i_q = \frac{1}{r_H} \left(u_q + i_d x_H \frac{\omega}{\omega_0} \right);$$

$$T_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = -E'_q + i_d(x_d - x'_d) + E_q \frac{\omega}{\omega_0};$$

$$T'_{dH} \frac{dE_q}{dt} = -E_q + E_B - u_{dB};$$

$$\begin{aligned} \frac{du_{dB}}{dt} = & -\left(\frac{1}{T_1} + \frac{k_2 T_2}{T_1 T'_{dH}} \right) u_{dB} + \\ & + \left(\frac{k_2}{T_1} - \frac{k_2 T_2}{T_1 T'_{dH}} \right) E_q + \frac{k_2 T_2}{T_1 T'_{dH}} E_B; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dE_B}{dt} = -\frac{1}{T_1} E_B + \frac{k_1}{T_1} \frac{\omega}{\omega_0} u_f;$$

$$u = (u_d^2 + u_q^2)^{0,5};$$

$$i = (i_d^2 + i_q^2)^{0,5};$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0;$$

$$M_\Gamma = -i_d i_q (x_q - x'_d) + E'_q i_q,$$

где u_d — напряжение статора по оси d ; u_q — напряжение статора по оси q ; i_d — ток статора по оси d ; i_q — ток статора по оси q ; E_q — ЭДС генератора; E'_q — ЭДС генератора за переходным сопротивлением x'_d ; E_B — ЭДС возбудителя; u_{dB} — напряжение реакции якоря возбудителя; u, i — напряжение и ток генератора; k_1, k_2, T_1, T_2 — коэффициенты и постоянные времени возбудителя; M_Γ — момент на валу генератора; ω — частота вращения ротора турбогенератора; ω_0 — синхронная частота вращения турбогенератора; δ — угол нагрузки генератора; u_f — напряжение возбуждения возбудителя, которое является и сигналом управления в этой системе; x_q — синхронное сопротивление генератора по оси q ; x'_d — синхронное сопротивление генератора по оси d ; r_H, x_H — активное и реактивное сопротивления нагрузки; T_{d0} — постоянная времени обмотки возбуждения генератора при разомкнутой обмотке якоря, с; T'_{dH} — постоянная времени обмотки возбуждения генератора, с.

Учитывая, что в относительных единицах выполнено равенство $I_f = E_q$, задачу стабилизации тока возбуждения СМ можно сформулировать как задачу стабилизации ЭДС турбогенератора или выполнение инварианта

$$E_q - E_{q0} = 0. \quad (5)$$

Для синтеза регулятора выделим уравнения, относящиеся к возбудителю, и приведем их к каноническому виду:

$$\begin{aligned} \frac{dE_q}{dt} &= -a_1 E_q + a_2 E_B - a_3 u_{dB}; \\ \frac{du_{dB}}{dt} &= -a_4 u_{dB} + a_5 E_q + a_6 E_B; \\ \frac{dE_B}{dt} &= -a_7 E_B + a_8 u_f, \end{aligned} \quad (6)$$

где $a_1 = a_2 = a_3 = \frac{1}{T'_{dH}}$, $a_4 = \frac{1}{T_1} + \frac{k_2 T_2}{T_1 T'_{dH}}$, $a_5 = \frac{k_2}{T_1} - \frac{k_2 T_2}{T_1 T'_{dH}}$, $a_6 = \frac{k_2 T_2}{T_1 T'_{dH}}$, $a_7 = \frac{1}{T_1}$, $a_8 = \frac{k_1}{T_1} \frac{\omega}{\omega_0}$.

Введем агрегированную макропеременную $\psi = E_0 - E_q$ и потребуем, чтобы ее траектория движения удовлетворяла уравнению

$$\ddot{\psi} + \lambda_1 \dot{\psi} + \lambda_2 \psi = 0. \quad (7)$$

При этом для обеспечения устойчивости переходного процесса необходимо выбирать λ_1 и λ_2 такими, чтобы корни характеристического полинома (7) были вещественными и отрицательными.

Совместное решение (6) и (7) позволяет найти требуемый закон управления напряжением возбуждения возбудителя, обеспечивающий выполнение инварианта (5). Регулятор тока возбуждения (ЭДС турбогенератора) в этом случае имеет вид

$$\begin{aligned} u_f &= \frac{1}{c_4} [(\lambda_1 a_1 - c_1 - \lambda_2) E_q + \\ &+ (c_2 - \lambda_1 a_2) E_B + (\lambda_1 a_3 - c_3) u_{dB} + \lambda_2 E_0]. \end{aligned} \quad (8)$$

Задачу стабилизации выходного напряжения генератора можно рассматривать в виде поиска закона изменения ЭДС генератора, обеспечивающего асимптотическую устойчивость замкнутой системы управления и выполнения инварианта

$$U^2 - U_0^2 = u_q^2 + u_d^2 - U_0^2 = 0. \quad (9)$$

Такая постановка позволяет ввести каскадную схему управления, в которой регулятор тока возбуждения является самостоятельной подсистемой, работающей автономно, либо в составе регулятора выходного напряжения турбогенератора.

Выразим составляющие тока i_d , i_q и напряжения u_d , u_q через E'_q и ω :

$$\begin{aligned} i_d &= -\frac{1}{r_H} \frac{\omega}{\omega_0} \frac{r_H^2 \omega_0^2 (x_q + x_H)}{r_H^2 \omega_0^2 + \omega^2 (x_q + x_H)(x'_d + x_H)} E'_q; \\ i_q &= \frac{1}{r_H} \frac{r_H^2 \omega_0^2}{r_H^2 \omega_0^2 + \omega^2 (x_q + x_H)(x'_d + x_H)} E'_q; \\ u_d &= -\frac{x_q}{r_H} \frac{\omega}{\omega_0} \frac{r_H^2 \omega_0^2}{r_H^2 \omega_0^2 + \omega^2 (x_q + x_H)(x'_d + x_H)} E'_q; \\ u_q &= E'_q - \frac{x'_d}{r_H} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \frac{r_H^2 \omega_0^2 (x_q + x_H)}{r_H^2 \omega_0^2 + \omega^2 (x_q + x_H)(x'_d + x_H)} E'_q. \end{aligned} \quad (10)$$

Введем агрегированную переменную вида

$$\psi = U^2 - U_0^2, \quad (11)$$

траектория движения которой должна удовлетворять уравнению

$$T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0. \quad (12)$$

Совместно решая (4), (11) и (12), получим

$$\begin{aligned} E_q &= \frac{1}{2 \frac{T_1}{T_{d0}} b_1 b_9 E'_q} [U_0^2 - 2 \frac{T_1}{T_{d0}} b_9 b_{10} E'_q - b_9 E_q'^2 - \\ &- 2 \omega E'_q (c_6 + c_7) \frac{\omega_0}{T_j} (M_T - M_T)], \end{aligned} \quad (13)$$

где $b_1 = \frac{\omega}{\omega_0}$, $b_2 = \frac{x'_d}{r_H} (x_q + x_H) b_1^2$, $b_3 = r_H^2 \omega_0^2$, $b_4 = (x_q + x_H)(x'_d + x_H)$, $b_5 = \frac{b_3}{b_3 + \omega^2 b_4}$, $b_6 = \frac{x_q}{r_H}$, $b_7 = (1 - b_2 b_5)^2$, $b_8 = (b_1 b_5 b_6)^2$, $b_9 = b_7 + b_8$, $b_{10} = i_d (x_d - x'_d) - E'_q$, $c_1 = r_H^2 \omega_0^2$, $c_2 = \omega (x_q + x_H)$, $c_3 = \omega (x'_d + x_H)$, $c_4 = c_2 c_3$, $c_5 = c_1 + c_4$, $c_6 = 2 x'_d \frac{c_2}{r_H^2} (c_5 - c_2 x'_d \omega) \left(\frac{c_4}{c_5} - 1 \right)$, $c_7 = x_q^2 \frac{c_1}{r_H^2} \left(1 - \frac{2 c_4}{c_5} \right)$; T_j — постоянная времени турбоагрегата; M_T — момент на валу газотурбинного привода.

Задачу стабилизации частоты вращения ротора будем рассматривать в рамках математической модели (4) без детализации динамики газотурбинного

привода (ГТП). При этом предполагается, что САУ ГТП является подсистемой, подчиненной СУТ (системе управления турбогенератором), а регулятор САУ ГТП — следящая система, обеспечивающая требуемое изменение механического момента турбины, которое рассчитывается в СУТ.

В таком контексте решение задачи стабилизации частоты вращения ротора, т. е. обеспечение выполнения инварианта

$$\omega - \omega_0 = 0 \quad (14)$$

возлагается на СУТ.

Формально закон изменения траектории момента турбины можно легко получить на основании уравнения движения ротора турбогенератора:

$$T_j \frac{1}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_G, \quad (15)$$

где T_j — постоянная времени турбоагрегата.

Для выполнения инварианта (14) и асимптотической устойчивости (15) относительно тривиального решения необходимо, чтобы траектория макропеременной $\psi = \omega - \omega_0$ являлась решением эволюционного уравнения

$$T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0 \quad (16)$$

при выполнении условия $T_2 > 0$.

Тогда совместное решение (15) и (16) дает закон изменения механического момента турбины:

$$M_T = M_G - \frac{T_j}{\omega_0 T_2} (\omega - \omega_0). \quad (17)$$

Часть переменных состояния объекта управления является ненаблюдаемой, поэтому для реализации полученных законов управления необходимо ввести в систему наблюдатель состояния.

Для (4) ненаблюдаемыми параметрами являются E_q , u_{dB} , E_B и параметры нагрузки r_H и x_H .

Параметры нагрузки можно оценить по соотношениям:

$$\begin{aligned} r_H &= \frac{i_d u_d + i_q u_q}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}}; \\ x_H &= \frac{i_d u_q - i_q u_d}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}}; \\ i_q &= \frac{U \sin \theta}{x_q}; \quad i_d = -\sqrt{I^2 - i_q^2}; \\ u_d &= -U \sin \theta; \quad u_q = U \cos \theta, \end{aligned} \quad (18)$$

где U , I — амплитуды напряжения и тока статора, θ — угол нагрузки генератора. E'_q рассчитывается по измеряемому выходному напряжению турбоге-

нератора на основании алгебраических соотношений (10). Для этого потребуется выполнить еще одно измерение — померить напряжение возбуждения СМ U_f , которое может быть снято на контактных кольцах ротора турбогенератора:

$$U_f = E_B - u_{dB}. \quad (19)$$

Для получения уравнения нелинейного наблюдателя состояния и оценки ЭДС турбогенератора введем макропеременную $\psi_3 = E_q - \Phi(E'_q) - z_1$, которая должна удовлетворять эволюционному уравнению

$$T_{eqz} \dot{\psi}_3 + \psi_3 = 0, \quad T_{eqz} > 0. \quad (20)$$

Если задать $\Phi(E'_q) = T_{d0} \frac{\omega_0}{\omega} \left(\frac{1}{T_{eqz}} - \frac{1}{T'_{dH}} \right) E'_q$, то, решая совместно (4) и (20), получим уравнение наблюдателя для ЭДС турбогенератора:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T'_{dH}} U_f + \frac{\omega_0}{\omega} \left(\frac{1}{T_{eqz}} - \frac{1}{T'_{dH}} \right) \left(1 - \frac{T_{d0}}{T_{eqz}} \right) E'_q - \\ - \frac{\omega_0}{\omega} \left(\frac{1}{T_{eqz}} - \frac{1}{T'_{dH}} \right) (x_d - x'_d) i_d - \frac{1}{T_{eqz}} z_1 - \dot{z}_1 = 0, \\ \omega > 0. \end{aligned} \quad (21)$$

При выполнении условия (асимптотического сближения траектории ННС и реальной координаты) $\psi_3 = 0$ получим выражение для оценки координаты E_q :

$$\hat{E}_q = T_{d0} \frac{\omega_0}{\omega} \left(\frac{1}{T_{eqz}} - \frac{1}{T'_{dH}} \right) E'_q + z_1, \quad \omega > 0. \quad (22)$$

С учетом соотношения (19) и полученной оценки \hat{E}_q на основании (4) аналогично могут быть получены уравнения наблюдателя и оценки для u_{dB} и E_B :

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 = -\frac{1}{T_1} z_2 + \left(\frac{k_2}{T_1} - \frac{k_2 T_2}{T_1 T'_{dH}} \right) \hat{E}_q + \frac{k_2 T_2}{T_1 T'_{dH}} U_f \\ \hat{u}_{dB} = z_2. \end{aligned} \quad (23)$$

Оценка ЭДС возбуждения возбудителя может быть легко получена из алгебраического соотношения:

$$\hat{E}_B = U_f + \hat{u}_{dB}. \quad (24)$$

Результаты моделирования замкнутой системы (4), (8), (13) с ННС (18), (22)—(24) приведены на рис. 1, 2. На рис. 1 показаны основные параметры турбогенератора и сигнал управления при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной величины. Управление ограничено величинами ± 3 отн. ед.

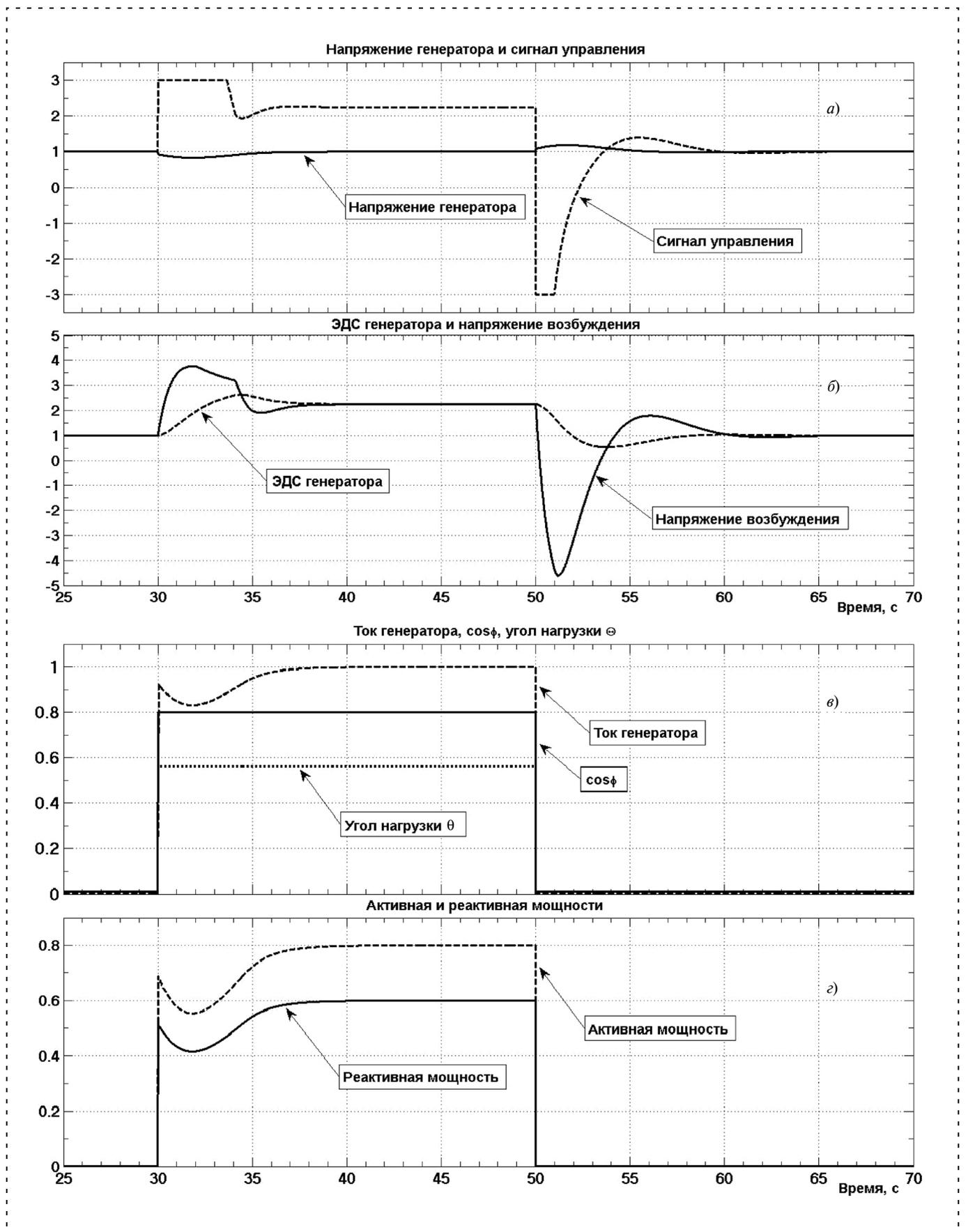


Рис. 1. Изменение напряжения генератора и сигнала управления (а), ЭДС генератора и напряжения возбуждения (б), тока генератора, $\cos\phi$ и угла нагрузки θ (в), активной и реактивной мощностей (г) в зависимости от времени при сбросе и набросе мощности на турбогенератор

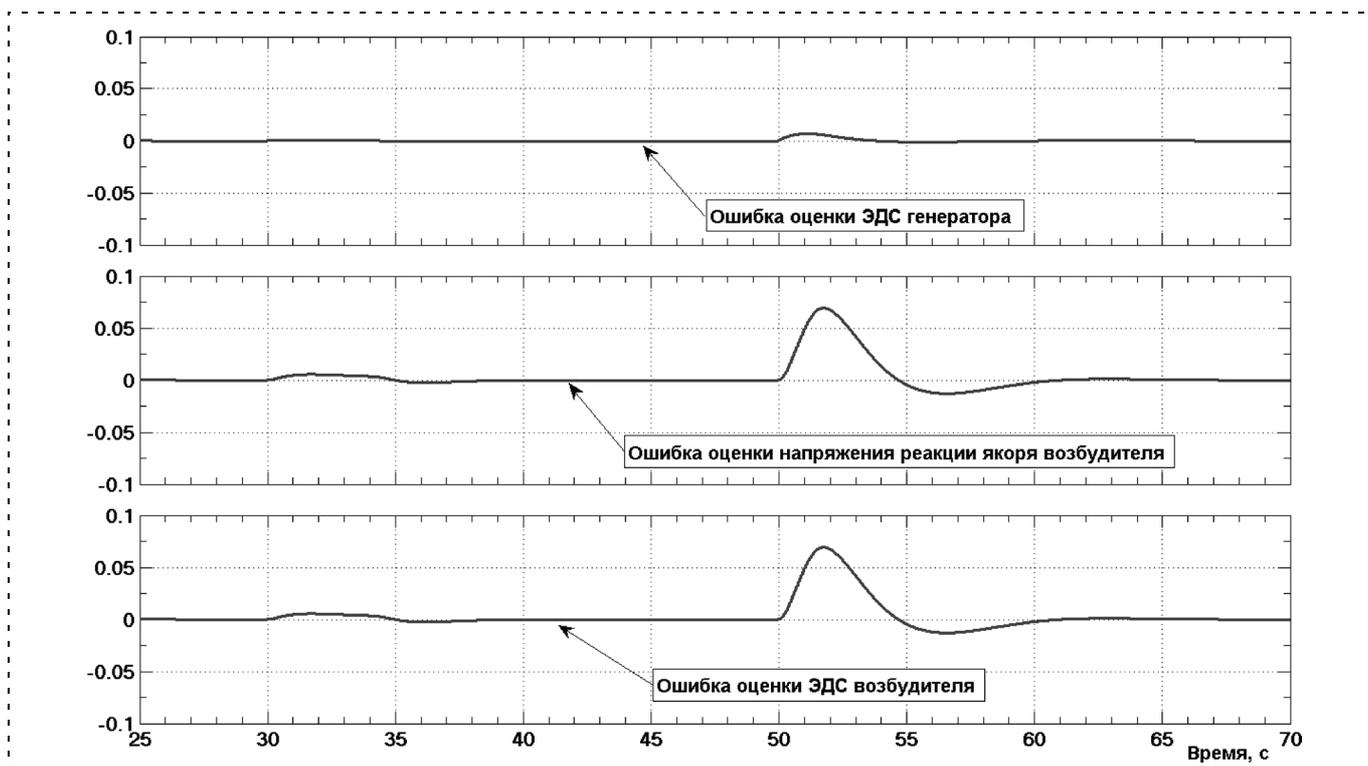


Рис. 2. Ошибки (сверху вниз — ЭДС генератора, напряжения реакции якоря возбудителя и ЭДС возбудителя) при оценке вектора состояний турбогенератора ННС

На рис. 2 видна работа ННС для неизмеряемых величин E_q , $u_{dв}$, $E_{в}$. Погрешность работы ННС оценивалась как разность между текущим значением переменной и ее оценкой, сформированной ННС.

Значение ошибки E_q незначительно и составляет менее одного процента. Максимальные значения ошибок для оценок $u_{dв}$ и $E_{в}$ достигают 10 % в момент переходного процесса, причем ошибка при сбросе мощности существенно больше. В установившемся режиме ННС обеспечивает асимптотическую сходимость параметра и его оценки.

Как видно из приведенных графиков, такие значения ошибок ННС позволяют регулятору обеспечить асимптотическую устойчивость и высокое быстродействие системы.

Выводы:

1. Предлагаемый подход к практическому построению системы управления энергоблоком в корне меняет классический подход к построению подобных систем, при котором задачи управления топливом и возбуждением рассматривались как самостоятельные задачи.

2. Использование для управления механическим моментом турбины измеряемых электрических параметров генератора, практически мгновенно отражающих характер нагрузки, обеспечивает устойчивую работу энергоблока в широком диапазоне изменения угла нагрузки турбогенератора.

3. Отличительной особенностью СУТ является отсутствие в ней регулятора тока возбуждения возбудителя, который заменен на регулятор ЭДС генератора (тока возбуждения синхронной машины). Вместо тока возбуждения возбудителя в системе управления предусмотрен замер напряжения возбуждения СМ, снимаемый с контактных колец ротора турбогенератора.

4. Математическая база представленных алгоритмов управления обеспечивает асимптотическую устойчивость, высокое быстродействие и астатические свойства регуляторов СУТ, а ННС, входящий в систему управления, позволяет выполнять оценку недоступных прямому измерению внутренних параметров турбогенератора и обеспечивает робастность системы управления к изменяющимся параметрам объекта управления.

Список литературы

1. Красовский А. А. Проблемы физической теории управления // Автоматика и телемеханика. 1990. № 11.
2. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2006.
3. Колесников А. А., Веселов Г. Е. и др. Синергетические методы управления сложными системами: Энергетические системы / Под общей ред. А. А. Колесникова. М.: КомКнига, 2006.
4. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высш. шк., 1985.
5. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем М.: Энергия, 1979.

М. Л. Сторублев, инженер,
Курский государственный
технический университет
max100rublev@yandex.ru

Определение показателей точности технологических процессов в ходе их выполнения на основе теории чувствительности

Рассмотрены показатели точности и стабильности технологических процессов. На основе теории чувствительности установлены зависимости для расчета показателей точности технологических процессов по результатам контроля входных параметров, позволяющие выполнять оценку показателей точности технологических процессов в ходе их выполнения.

Ключевые слова: точность технологического процесса, показатели точности и стабильности, качество, теория чувствительности.

В иерархической системе управления производством управление технологическими процессами (ТП) находится на низшем уровне и обеспечивает заданное качество и количество продукции. Количественное представление настройки технологического процесса и его вариации — основа для определения качества изделий в любом производстве. При анализе любого технологического процесса (планировании качества разрабатываемой продукции, планировании приемочного контроля и т. д.) нужно оценить его возможности удовлетворять предъявляемым к нему требованиям.

Технологический процесс непосредственно обеспечивает качество продукции, поэтому управление технологическим процессом путем анализа и регулирования его точности и стабильности — весьма эффективный путь управления качеством продукции.

Точность технологического процесса — это степень соответствия результатов его исполнения установленным требованиям [1].

Стабильность технологического процесса — свойство сохранять точность признаков качества при протекании процесса без остановки в течение некоторого времени [1].

Статистические методы управления качеством технологических процессов

Технологический процесс представляет собой сложный объект с множеством входных параметров (механических, физико-химических свойств материала заготовки; параметров хода технологического

процесса: температуры, давления, скорости, подачи и т. д.; характеристик и параметров оборудования, режущих инструментов и др.) и выходных параметров (свойства материала изделия, размеры изделия, количество, стоимость и т. д.).

В ходе технологического процесса происходит изменение всех входных параметров, влияющих на показатель качества ТП, поэтому оценка влияния каждого входного параметра выполняется посредством обобщения всех результатов. С помощью многофакторного анализа сбор статистических данных можно реализовать путем пассивного или активного эксперимента [18, 19]. Полученные по результатам эксперимента уравнения, описывающие взаимосвязи между входными параметрами ТП и показателями качества, позволяют решить задачу синтеза, заключающуюся в определении допусков на входные параметры ТП.

Одним из путей выявления резервов точности производства являются статистические методы управления и оценки точности ТП.

Статистический анализ точности и стабильности технологического процесса — это установление статистическими методами значений показателей точности и стабильности технологического процесса и определение закономерностей его протекания во времени [2].

Несмотря на особенности методов анализа точности и стабильности, применяемых в различных производствах [3—10, 20—22], в их основе лежат показатели точности и стабильности [7, 11, 12], требующие расчета среднего значения, дисперсии и других статистических характеристик. Показатели точности и стабильности характеризуют потенциальные и фактические возможности процесса удовлетворять установленному техническому допуску для значений контролируемого показателя качества ТП и рассчитываются по результатам контроля готовой продукции, что не позволяет избежать производства непригодной продукции и связанных с этим необоснованных затрат различных видов ресурсов. Особенно остро эта проблема стоит в массовом автоматизированном производстве [13], когда информация о состоянии ТП к моменту ее обработки не отражает истинной ситуации.

Основными показателями точности технологических процессов согласно ГОСТ 27.202—83 [12] являются:

- 1) коэффициент точности K_T ,
- 2) коэффициент мгновенного рассеяния $K_p(t)$;
- 3) коэффициент смещения контролируемого параметра K_c ;
- 4) коэффициент запаса точности по контролируемому параметру $K_3(t)$.

Для расчета перечисленных показателей точности необходимы опытно-статистические данные о контролируемых параметрах, которые получают по результатам завершения всего технологического процесса, либо его части. Вмешательство в ход процесса происходит с запаздыванием, в результате чего могут возникать существенные материальные затраты, связанные с выпуском бракованных изделий.

Статистическое регулирование ТП с использованием контрольных карт для контроля за состоянием ТП во времени заключается в корректировании параметров ТП по результатам выборочного контроля показателей качества ТП, что позволяет получать информацию о состоянии ТП в ходе их выполнения [14–17]. К недостаткам методов статистического регулирования можно отнести: трудность или даже невозможность выполнять контроль показателей качества некоторых ТП в ходе их выполнения (при нанесении покрытий, обработке резанием и т. д.); отсутствие установленных математических зависимостей между показателями качества и входными параметрами ТП для корректировки входных параметров.

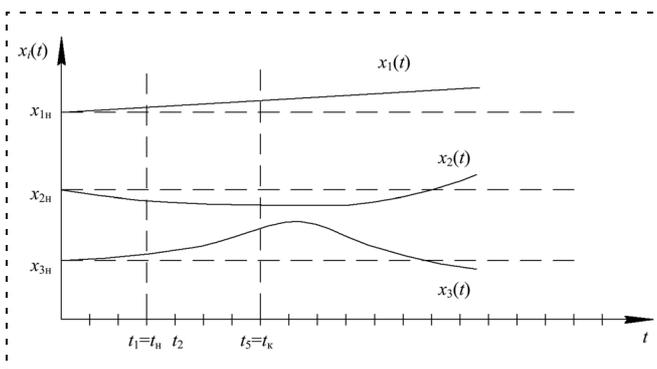
Анализ результатов контроля точности ТП позволяет последовательно выявить входные параметры, приводящие к нарушению точности; установить значимость влияния каждого из входных параметров; рассчитать границы регулирования параметров ТП. Постоянно изменяющиеся требования к качеству выпускаемой продукции приводят к необходимости оценки возможностей технологического процесса путем статистического анализа отклонений его входных параметров. Для решения данной задачи необходимо установить зависимости между входными параметрами и показателями точности и стабильности ТП.

Расчет показателей точности технологических процессов по результатам контроля отклонений его входных параметров

Пусть на основе анализа технологического процесса или его части — отдельной операции — контролируемый выходной параметр y представляет собой функцию многочисленных входных параметров ТП x_i ($i = 1, \dots, m$):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m). \quad (1)$$

В производственных условиях значения входных параметров ТП не остаются постоянными и отличаются от заданных (номинальных) значений (см. рисунок). Определяя в ходе ТП за промежуток времени $\Delta t = t_k - t_n$ значения входных параметров



Изменение входных параметров технологического процесса

ТП, т. е. осуществляя для каждого входного параметра ТП выборку объемом n и сравнивая полученные значения входных параметров ТП с их номинальными значениями, получают различные сочетания отклонений значений входных параметров ТП, влияющие на отклонение контролируемого показателя качества ТП.

Выборка должна быть случайной, представительной и должна отбираться в соответствии с требованиями ГОСТ 18321 [23]. В общем случае чем больше объем выборки, тем точнее можно оценить состояние процесса в текущее время [6], а для получения оперативной информации о состоянии технологического процесса используются мгновенные выборки [15]. Следует отметить, что частота взятия выборок и их объем могут изменяться. Выборки большого объема используются для обнаружения незначительных сдвигов технологического процесса, а более частые выборки малого объема применяют для своевременного обнаружения значительных сдвигов процесса. Объемы мгновенной выборки, используемые для расчета показателей точности ТП K_T , $K_p(t)$, K_c , $K_3(t)$, определяются по ГОСТ 27.202–83 и изменяются в пределах от 2 до 20.

Значения отклонения контролируемого выходного параметра ТП определяются по результатам выборки объемом n , но только после завершения всего ТП либо его части. Тогда с учетом (1) отклонение контролируемого выходного параметра Δy представляет собой функцию отклонений входных параметров ТП $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$:

$$\Delta y = f(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m). \quad (2)$$

Предлагается разработать зависимости, используя основные положения теории чувствительности [19], позволяющие выполнять в ходе технологического процесса оценку его точности, что позволит своевременно вмешиваться в процесс.

В общем случае выражение для определения отклонения контролируемого выходного параметра ТП в любой момент времени t_i имеет вид

$$\Delta y_i = \sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_i), \quad (3)$$

где a_j — коэффициент чувствительности j -го входного параметра ТП, характеризующий степень влияния изменения входного параметра на контролируемый выходной параметр; Δx_j — отклонение значения j -го входного параметра от номинального в момент времени t_i ; $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$. Число слагаемых в выражении (3) в любой момент времени t_i будет равно числу входных параметров ТП, изменение которых приводит к изменению выходного параметра ТП. Так, для момента времени t_2 (см. рисунок) выражение (3) будет иметь вид:

$$\Delta y_2 = a_1 \Delta x_1(t_2) + a_2 \Delta x_2(t_2) + a_3 \Delta x_3(t_2).$$

Так как точность ТП зависит от отклонений значений входных параметров ТП от номинальных, то и значения коэффициентов точности ТП определяются близостью значений входных параметров ТП к их номинальным значениям.

- Коэффициент мгновенного рассеяния $K_p(t)$ определяется по формуле

$$K_p(t) = \frac{\omega(t)}{T}, \quad (4)$$

где T — допуск на контролируемый выходной параметр; $\omega(t)$ — поле рассеяния контролируемого выходного параметра в выборке:

$$\omega(t) = y_{\max} - y_{\min} = y_0 + \Delta y_{\max} - y_0 - \Delta y_{\min},$$

где y_0 — значение выходного параметра, соответствующее середине поля допуска (при симметричном поле допуска значение y_0 совпадает с номинальным значением параметра $y_{\text{ном}}$); $\Delta y_{\max} = \max(\Delta y_i)$, $\Delta y_{\min} = \min(\Delta y_i)$ — максимальное и минимальное значения отклонения контролируемого выходного параметра ТП в выборке.

Тогда с учетом (3) и (4) выражение для определения $K_p(t)$ можно записать следующим образом:

$$K_p(t) = \frac{\max \left[\sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_1), \dots, \sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_n) \right] - \min \left[\sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_1), \dots, \sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_n) \right]}{T}. \quad (5)$$

- Коэффициент смещения контролируемого выходного параметра определяется по формуле

$$K_c = \frac{\Delta(t)}{T}, \quad (6)$$

где $\Delta(t)$ — отклонение среднего значения контролируемого выходного параметра относительно середины поля допуска:

$$\Delta(t) = |\bar{y}(t) - y_0|, \quad (7)$$

где $\bar{y}(t)$ — среднее значение контролируемого выходного параметра.

Для нахождения среднего значения (центра рассеяния) контролируемого выходного параметра в случае его записи в абсолютных значениях используют формулу

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (8)$$

где n — число наблюдений в выборке.

Используя вместо абсолютных значений результатов измерений их отклонения от заданного начала отсчета y_0 , выражение (8) можно записать в виде

$$\bar{y} = y_0 + \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i}{n}. \quad (9)$$

Подставляя выражение (9) в (7), получаем формулу для расчета отклонения среднего значения контролируемого выходного параметра:

$$\Delta(t) = \left| \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i}{n} \right|. \quad (10)$$

С учетом (3) выражение для расчета отклонения среднего значения контролируемого выходного параметра примет вид

$$\Delta(t) = \left| \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_i)}{n} \right|. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (6), получаем выражение для расчета коэффициента смещения контролируемого выходного параметра:

$$K_c = \frac{\left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_i) \right|}{Tn}. \quad (12)$$

- Коэффициент точности рассчитывают по формуле

$$K_T = \frac{\omega}{T}, \quad (13)$$

где ω — поле рассеяния в объединенной выборке, определяемое как разность между максимальным и минимальным значениями контролируемого выходного параметра в объединенной выборке.

По аналогии с выражением (5) для определения коэффициента мгновенного рассеяния $K_p(t)$ получаем выражение для расчета коэффициента точности:

$$K_T = \frac{\max \left[\sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_1), \dots, \sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_N) \right] - \min \left[\sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_1), \dots, \sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_N) \right]}{T} \quad (14)$$

где N — объем объединенной выборки, определяемый как $n \times k$, k — число выборок.

- Выражение для расчета коэффициента запаса точности по контролируемому выходному параметру имеет вид

$$K_3(t) = 0,5 - K_c - 0,5K_p(t). \quad (15)$$

С учетом (5) и (12) выражение для определения $K_3(t)$ будет выглядеть следующим образом:

$$K_3(t) = 0,5 - \frac{\left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_i) \right|}{Tn} - \frac{\max \left[\sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_1), \dots, \sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_n) \right]}{2T} - \frac{\min \left[\sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_1), \dots, \sum_{j=1}^m a_j \Delta x_j(t_n) \right]}{2T}. \quad (16)$$

Пример. В ходе технологического процесса было установлено, что контролируемый выходной параметр $y = 14 \pm 0,6$ зависит от двух входных параметров x_1 и x_2 , номинальные значения которых равны соответственно 4 и 2, данные по результатам двух выборок представлены в таблице.

Значения коэффициентов чувствительности определяются из решения системы линейных уравнений

$$\Delta X A = \Delta Y, \quad (17)$$

Значения контролируемого выходного параметра и входных параметров ТП

	Выборка 1					Выборка 2				
x_1	4,1	4,2	4,0	3,9	3,7	3,8	4,2	4,2	3,8	4,0
x_2	1,9	2,0	1,8	1,8	1,9	2,3	2,2	1,7	2,1	2,2
y	13,9	14,4	13,4	13,2	13,1	14,5	15,0	13,5	13,9	14,6

где ΔX — $m \times m$ -мерная матрица значений отклонений входных параметров ТП от номинальных значений; ΔY — m -мерный вектор-столбец значений отклонений контролируемого выходного параметра ТП; A — m -мерный вектор-столбец коэффициентов чувствительности.

После решения системы уравнений (17), в которой были использованы данные, представленные в таблице, получена зависимость отклонения контролируемого выходного параметра ТП от отклонений входных параметров ТП:

$$\Delta y = 2\Delta x_1 + 3\Delta x_2.$$

С использованием табличных данных, по полученным зависимостям (5), (12), (14), (16) были рассчитаны значения показателей точности ТП: $K_p(t) = 1,08$; $K_c = 0,33$; $K_T = 1,58$; $K_3(t) = -0,62$, равные значениям, рассчитанным по формулам, рекомендуемым ГОСТ 27.202—83.

Справедливость полученных выражений и возможность их применения для контроля точности и стабильности технологических процессов подтверждена моделированием различных технологических процессов, а также опытом практического применения при обеспечении точности и стабильности процессов нанесения гальванических покрытий на ОАО "Геомаш" (г. Щигры).

Предложены зависимости для расчета показателей точности технологических процессов, позволяющие в ходе технологических процессов выполнять оценку их точности в целях управления качеством выпускаемой продукции путем регулирования значений входных параметров ТП по результатам степени влияния их изменения на контролируемый показатель качества ТП, а также путем обоснованного назначения допусков на входные параметры ТП.

Список литературы

1. Канне М. М., Иванов Б. В., Корешков В. Н., Схиртладзе А. Г. Системы, методы и инструменты менеджмента качества: Учеб. пособ. СПб.: Питер, 2008. 560 с.
2. Статистический анализ точности и стабильности технологических процессов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.spc-consulting.ru/app/statenl.htm>.
3. Боровков А. А. Математическая статистика. Оценка параметров. Проверка гипотез. М.: Наука, 1984. 472 с.
4. Дальский М. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 223 с.
5. Кокрен У. Методы выборочного исследования. М.: Статистика, 1976. 440 с.
6. Жулинский С. Ф., Новиков Е. С., Поспелов В. Я. Статистические методы в современном менеджменте качества. М.: Фонд "Новое тысячелетие", 2001. 208 с.
7. Статистическое управление процессами SPC. Н. Новгород: АО НИЦ КД, СМЦ "Приоритет", 1999.

8. **Окрепилов В. В.** Управление качеством. М.: Экономика, 1998. 639 с.
9. **Адлер Ю. П., Шпер В. Л.** Индексы воспроизводимости процессов (краткий обзор современного состояния) // Вестник машиностроения. 1994. № 2.
10. **Клячкин В. Н.** Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии: Учеб. пособ. М.: Финансы и статистика, 2007. 304 с.
11. **ГОСТ Р 50779.44—2001.** Статистические методы. Индексы возможностей процессов. Основные методы расчета.
12. **ГОСТ 27.202—83.** Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции.
13. **Григорьевич В. Г., Юдин С. В., Козлова Н. О., Шильдин В. В.** Информационные методы в управлении качеством. М.: РИА "Стандарты и качество", 2001. 208 с.
14. **Исаков В. Н.** Применение статистических методов контроля и регулирования технологических процессов при производстве деталей подшипников // Методы менеджмента качества. 2008. № 8. С. 32—38.
15. **ГОСТ Р 50779.40—96.** Статистические методы. Контрольные карты. Общее руководство и введение.

16. **ГОСТ Р 50779.42—99.** Статистические методы. Контрольные карты Шухарта.
17. **Шайнин П. Д.** Инструменты качества. Часть III: Контрольные карты // Методы менеджмента качества. 2000. № 1. С. 17—22.
18. **Сизенов Л. К., Масленников А. М.** Анализ и расчет точности в судовом машино- и приборостроении. Л.: Судостроение, 1988. 272 с.
19. **Системы** автоматизированного проектирования: в 9-ти кн. Кн. 5. Автоматизация функционального проектирования: Учеб. пособ. для вузов / П. К. Кузьмик, В. Б. Маничев; Под ред. И. П. Норенкова. М.: Высш. шк., 1986. 144 с.
20. **Солонин И. С.** Математическая статистика в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1972. 215 с.
21. **Статистические** методы обработки эмпирических данных. М.: Издательство стандартов, 1978. 232 с.
22. **Бородачев Н. А.** Анализ качества и точности производства. М.: Машгиз, 1946. 256 с.
23. **ГОСТ 18321—73.** Статистический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции.

УДК 681.518.001.5

М. Ю. Косинский, студент,
В. А. Шихин, канд. техн. наук, доц.,
Московский энергетический институт
(технический университет)
universe@mpei.ac.ru

Исследование возможностей нечетких моделей для оценивания эксплуатационной надежности автоматизированных систем

Обсуждается применение аппарата теории нечетких множеств для оперативного оценивания надежности автоматизированных систем в процессе промышленной эксплуатации. Выделены и рассмотрены основные факторы, влияющие на надежность систем. Предложена методика оценивания эксплуатационной надежности и разработана соответствующая вычислительная процедура.

Ключевые слова: надежность, теория нечетких множеств, автоматизированные системы.

Введение

Одной из важных характеристик автоматизированной системы является ее надежность. Под надежностью принято понимать свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования [7]. Поскольку современные автоматизированные сис-

темы имеют сложную структуру, усложняется и сам процесс получения числовых значений показателей надежности.

К указанному классу систем относятся, в частности, автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ), создаваемые для крупных территориально-распределенных промышленных корпораций. АИИС КУЭ обладают как структурной (схемной) сложностью, так и функциональной (элементной) неоднородностью. Составляющими элементами АИИС КУЭ являются измерительные трансформаторы тока и напряжения, электросчетчики, промышленные контроллеры, преобразователи интерфейсов, повторители, сетевые адаптеры, спутниковые, телефонные и радиомодемы, серверы и серверное оборудование, включая архиваторы, системы кондиционирования и источники бесперебойного электропитания, автоматизированные рабочие места с установленным специальным программным обеспечением, каналообразующее оборудование проводных и беспроводных каналов связи, межсетевые интерфейсы и др.

На этапе проектирования АИИС КУЭ расчет надежности осуществляется, как правило, классическими методами и согласно известной нормативной документации [9]. Однако в процессе эксплуатации АИИС КУЭ происходят не только временные процессы старения, но и слабо предсказуемые внешние воздействия типа коротких замыканий, аварийных остановов и пусков мощных энергоагрегатов, скачков питающего напряжения, импульс-

ных помех и др. Проходят плановые и внеплановые замены оборудования. Таким образом, применение классических подходов к расчету оценок надежности АИИС КУЭ, находящихся на этапе эксплуатации, оказывается малоэффективным. Вместе с тем, динамические модели надежности в традиционной форме, отражающие тенденции изменения надежности как отдельных элементов, фрагментов АИИС КУЭ, так и системы в целом, представляют собой весьма сложные модели, трудные как для построения, так и для практического использования.

Таким образом, требуется разработка новых подходов к оценке надежности автоматизированных систем, находящихся в постоянной промышленной эксплуатации. В данной статье предлагается строить математическую модель для оценки надежности автоматизированных систем, находящихся в промышленной эксплуатации, основываясь на математическом аппарате теории нечетких множеств.

1. Формализация задачи анализа надежности в терминах теории нечетких множеств

Задачу оценивания надежности предлагается решать с помощью системы нечетких отношений, изображенной на рис. 1.

Как видно из рис. 1, процедура оценивания надежности разделяется на три этапа. Рассмотрим их подробнее:

Этап 1. Фазификация. На данном этапе численно заданные входные переменные $x_1 \dots x_m$ преобразуются в нечеткие лингвистические переменные $x_1^* \dots x_m^*$ согласно функциям принадлежности $\mu(x)$, определяющим соответствующие фазимножества.

Этап 2. Генерация нечетких соотношений. На данном этапе на основе нечетких отношений R (правил) предпочтения типа "ЕСЛИ-ТО" и значений нечетких входных переменных формируется нечеткий вывод в виде значений нечетких выходных переменных: $x_1^* \wedge x_2^* \wedge \dots \wedge x_{m-1}^* \wedge x_m^* = y_i^*, i \in [1, l]$.

Этап 3. Дефазификация. Этап дефазификации заключается в получении числового значения нечеткой выходной переменной (вывода) y_i^* на осно-

вании соответствующей ей функции принадлежности.

Следовательно, для возможности использования системы нечетких отношений для оценивания надежности необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Определить список входных и выходных лингвистических переменных и сформировать множество их термов.
2. Сформировать функции принадлежности входных и выходных лингвистических переменных.
3. Синтезировать поле решающих правил.
4. Определить способ формирования нечеткого логического вывода и способ дефазификации.

2. Определение списка входных и выходных лингвистических переменных и формирование множества их термов

За годы эксплуатации автоматизированных систем накопился значительный опыт в части оценивания надежности по различным признакам (условия эксплуатации, возраст и т. п.).

Предлагается выделить следующие факторы, наиболее сильно влияющие на надежность автоматизированных систем в процессе промышленной эксплуатации:

- фактор длительности эксплуатации элементов системы.

На различных этапах жизненного цикла автоматизированной системы показатели надежности отдельных устройств и системы в целом являются переменными во времени величинами, в частности, могут изменяться скачкообразно. Статистические оценки показателей надежности могут соответствовать различным законам распределения вероятностей на различных этапах жизненного цикла. Последний фактор часто не учитывается при расчетах классическими методами;

- фактор фактической нагрузки на элементы системы.

Как показывает практика, превышение допустимой нагрузки для любого устройства ведет к ухудшению его показателей надежности. Кроме того, в электроэнергетических системах имеют место так называемые "ударные нагрузки" (например, короткие замыкания);

- сложность структуры системы.

Увеличение числа элементов (включая резервирование) в автоматизированной системе можно считать существенным фактором, влияющим на надежность системы в целом.

Для учета вышеописанных факторов введем следующие входные лингвистические переменные:

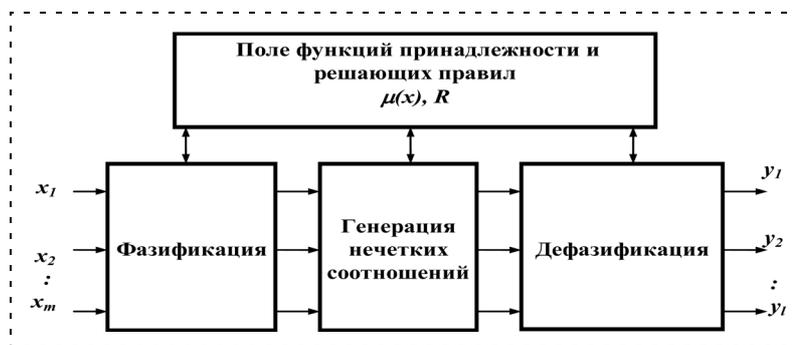


Рис. 1. Структурная схема системы нечетких отношений

- **<срок эксплуатации>** T ;
- **<отклонение режима>** δ отклонение от номинального режима работы.

Например, для автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии таким показателем может быть отклонение напряжения (тока) в электрической сети от номинальных значений;

- **<сложность системы>** N .

Данная переменная носит обобщенный характер. Применительно к конкретным системам в качестве показателя сложности можно, например, использовать число элементов, входящих в систему.

В качестве выходной переменной предлагается рассматривать коэффициент готовности системы: **<коэффициент готовности>** K_r . Это связано с тем, что, во-первых, автоматизированные системы относятся к классу восстанавливаемых систем, во-вторых, для восстанавливаемых систем коэффициент готовности K_r является одним из наиболее информативных показателей надежности [7]. В-третьих, если надежность системы регламентируется нормативными документами, то для этого, как правило, также используется данный показатель [8, 9].

3. Формирование функций принадлежности

К настоящему времени накоплен значительный опыт по разработке функций принадлежности $\mu(x)$ для лингвистических переменных в различных прикладных областях [3]. На основе анализа существующих разработок и основных правил синтеза функций принадлежности сконструируем нечеткие функции принадлежности для каждой лингвистической переменной, как входной, так и выходной.

Выбор вида функции принадлежности может зависеть от специфики каждой конкретной задачи. В данном случае предложено использовать треугольные и трапециевидные функции принадлежности.

- ♦ Входная лингвистическая переменная **<срок эксплуатации>**.

Введем для данной переменной термы "опытная эксплуатация" (ОЭ), "гарантийный срок эксплуатации" (ГСЭ), "постоянная промышленная эксплуатация" (ППЭ), "планово-предупредительный ремонт" (ППР), "конец срока службы" (КСС).

Терм "Опытная эксплуатация" характеризует период эксплуатации системы, в течение которого проверяется способность системы выполнять требуемые функции и выявляются ее недостатки. В этот

период в системе могут наблюдаться отказы, вызванные тем, что режимы работы оборудования могут отличаться от предполагаемых при проектировании. Как правило, опытная эксплуатация длится не более полугода после начала работы системы, в редких случаях она достигает 1 года.

Выбор терма "Гарантийный срок эксплуатации" обусловлен тем, что у новых устройств наблюдается непостоянство интенсивности отказов, связанное, в частности, с тем, что в этот период могут проявляться скрытые дефекты. Таким образом, вероятность отказа в данный период будет выше, чем в период нормальной эксплуатации. Вместе с тем, как правило, производители компонентов автоматизированных систем устанавливают длительность периода гарантийного периода эксплуатации, не превышающую трех лет [10].

Терм "Постоянная промышленная эксплуатация" характеризует период жизненного цикла оборудования, когда будет наблюдаться относительное постоянство интенсивности отказов.

Терм "Планово-предупредительный ремонт" характеризует период проверки и профилактического обслуживания оборудования. В этот период интенсивность отказов обычно бывает выше по сравнению с периодом нормальной эксплуатации. Данный факт непосредственно связан с установлением обоснованных сроков планово-предупредительных ремонтов.

Терм "Конец срока службы" характеризует период жизненного цикла системы, когда отказы, главным образом, обусловлены изношенностью оборудования. Значение интервалов выбирается из показателей срока службы отдельных элементов, а также всей системы в целом, которые в основном лежат в диапазоне 20...25 лет.

Учитывая повторяемость периодов жизненного цикла в реальных автоматизированных системах, предлагается использовать термы ППР и ППЭ несколько раз.

Пример выбора границ интервалов термов для лингвистической переменной **<срок эксплуатации>** представлен в виде табл. 1.

В итоге функции принадлежности будут иметь вид, изображенный на рис. 2.

- ♦ Входная лингвистическая переменная **<отклонение режима>**.

Для данной входной лингвистической переменной введем термы "отрицательное значительное" (ОЗ),

Таблица 1

Термы лингвистической переменной **<срок эксплуатации>**

Терм	ОЭ	ГСЭ	ППЭ1	ППР1	ППЭ2	ППР2	ППЭ3	КСС
Границы интервальных значений, (ед. измерений — год)	(0):(1)	(0):(3)	(3):(8)	(6):(10)	(8):(16)	(14):(18)	(16):(25)	(22):(25)

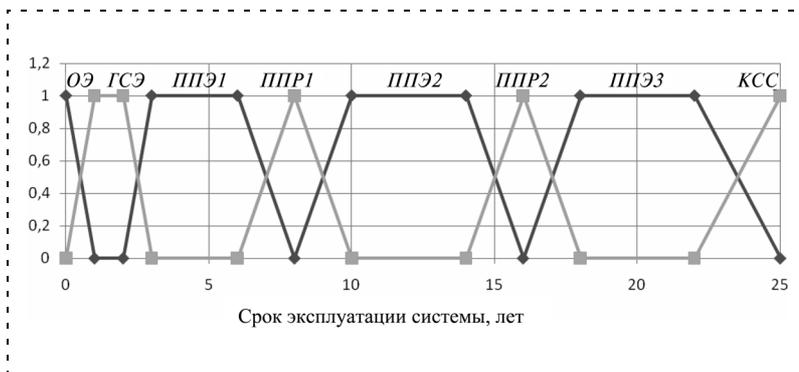


Рис. 2. Функции принадлежности для входной лингвистической переменной <срок эксплуатации>

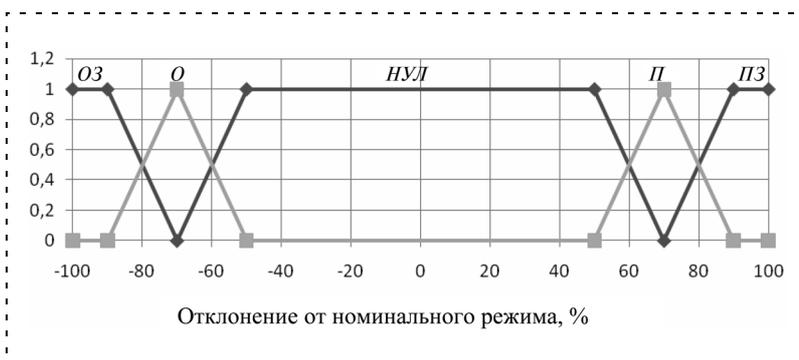


Рис. 3. Функции принадлежности для входной лингвистической переменной <отклонение режима>

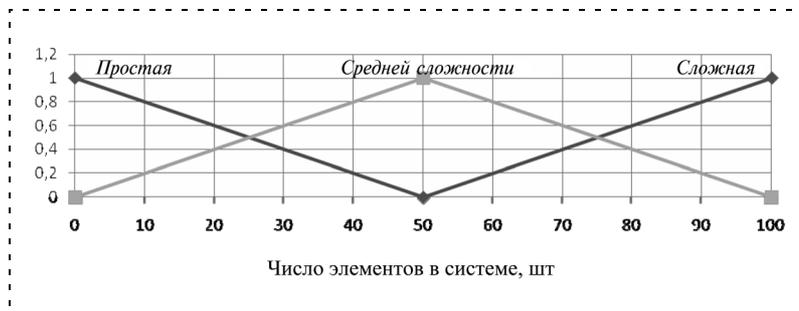


Рис. 4. Функции принадлежности для входной лингвистической переменной <сложность системы>

"отрицательное" (О), "нулевое" (НУЛ), "положительное" (П), "положительное значительное" (ПЗ), характеризующие степень отклонения от номинального режима работы. Пример выбора границ интервалов термов представлен в табл. 2.

Функции принадлежности будут иметь вид, изображенный на рис. 3.

♦ Входная лингвистическая переменная <сложность системы>.

Определим следующий набор термов, характеризующих сложность рассматриваемой системы по числу входящих в нее элементов: "простая", "средней сложности", "сложная".

Пример выбора границы интервалов термов представлен ниже в табл. 3. Числовые значения даны в абсолютных значениях в привязке к конкретной предметной области.

Функции принадлежности будут иметь вид, изображенный на рис. 4.

♦ Выходная лингвистическая переменная <коэффициент готовности>.

Для выходной лингвистической переменной <коэффициент готовности> K_T введем термы "неудовлетворительный", "удовлетворительный", "хороший", "отличный". Данный набор понятий является привычным для эксперта при описании состояния различных объектов и систем. Такой ограниченный набор термов должен упростить как задачу формирования границ интервалов термов экспертом применительно к конкретной системе, так и интерпретацию получаемых при расчетах результатов без потери в содержательности.

Пример выбора границы интервалов представлен ниже в табл. 4.

Таблица 2

Термы лингвистической переменной <отклонение>

Терм	ОЗ	О	НУЛ	П	ПЗ
Границы интервалов (ед. измерений — % к номинальному режиму)	(-100):(-70)	(-90):(-50)	(-70; 70)	(50):(90)	(70):(100)

Таблица 3

Термы лингвистической переменной <сложность системы>

Терм	Простая	Средней сложности	Сложная
Границы интервалов, (ед. измерений — шт.)	(0):(50)	(0):(100)	(50):(100)

Таблица 4

Термы лингвистической переменной <коэффициент готовности>

Терм	Неудовлетворительный	Удовлетворительный	Хороший	Отличный
Границы интервалов	(0,5):(0,7)	(0,5):(0,85)	(0,7):(1)	(0,85):(1)

В качестве минимального рассматриваемого значения коэффициента готовности системы выбрано значение $K_r = 0,5$ на основе общепринятого подхода к проектной надежности автоматизированных систем управления в промышленности. Однако с учетом необходимости расчетов K_r для предметной области электроэнергетики и реальных сроков их промышленной эксплуатации предлагается использовать расширенные термы (например, "крайне неудовлетворительный"). Такой подход позволяет более точно учесть состояние промышленных систем, находящихся в эксплуатации продолжительное время.

Получившиеся в результате для данной лингвистической переменной функции принадлежности изображены на рис. 5.

4. Синтез поля решающих правил

Данный этап решения задачи оценивания эксплуатационной надежности заключается в формировании на основе экспертных оценок статистических данных по отказам решающих правил R , согласно которым входные нечеткие лингвистические переменные отображаются в выходные нечеткие лингвистические переменные. В общем случае суть нечеткого решающего правила R состоит в отображении одного нечеткого множества в другое. В большинстве практических приложений наиболее эффективным подходом к решению данной задачи считается конструирование решающих правил в виде бинарного поля [5]. Бинарные поля нечетких ре-

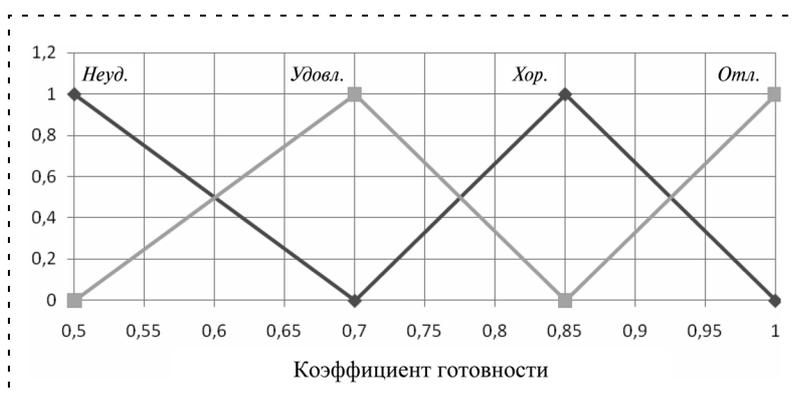


Рис. 5. Функции принадлежности для входной лингвистической переменной

шающих правил используют терминологию трех измерений при описании функций принадлежности соответствующих лингвистических переменных. При этом проводится согласование функций принадлежности для входных и соответствующих выходных переменных. При этом по осям X, Y располагаются функции принадлежности входных переменных, а по оси Z — выходной переменной. Поскольку в данном случае имеется три входные переменные: $\langle \text{срок эксплуатации} \rangle T$, $\langle \text{отклонение режима} \rangle \delta$, $\langle \text{сложность системы} \rangle N$, то для использования вышеописанного подхода к нечетким выводам предлагается сконструировать бинарные поля для двух входных лингвистических переменных при зафиксированном значении третьей. Для того чтобы число полей решающих правил было минимально возможным, предлагается фиксировать лингвистическую переменную с минимальным числом термов (мощностью терм-множества). Такой переменной является $\langle \text{сложность системы} \rangle$, мощ-

Таблица 5

Матрица бинарных отношений поля решающих правил R_1

$\delta \backslash T$	ОЭ	ГСЭ	ППЭ1	ППР1	ППЭ2	ППР2	ППЭ3	КСС
ОЗ	УДОВЛ	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД
О	УДОВЛ	ХОР	ХОР	УДОВЛ	ХОР	УДОВЛ	УДОВЛ	УДОВЛ
НУЛ	ХОР	ОТЛ	ОТЛ	ХОР	ОТЛ	ХОР	ХОР	УДОВЛ
П	УДОВЛ	ХОР	ХОР	УДОВЛ	УДОВЛ	НЕУД	УДОВЛ	НЕУД
ПЗ	УДОВЛ	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД

Таблица 6

Матрица бинарных отношений поля решающих правил R_2

$\delta \backslash T$	ОЭ	ГСЭ	ППЭ1	ППР1	ППЭ2	ППР2	ППЭ3	КСС
ОЗ	УДОВЛ	НЕУД						
О	УДОВЛ	ХОР	УДОВЛ	УДОВЛ	УДОВЛ	УДОВЛ	УДОВЛ	НЕУД
НУЛ	ХОР	ХОР	ОТЛ	ХОР	ХОР	УДОВЛ	ХОР	УДОВЛ
П	УДОВЛ	УДОВЛ	УДОВЛ	НЕУД	УДОВЛ	НЕУД	УДОВЛ	НЕУД
ПЗ	УДОВЛ	НЕУД						

Матрица бинарных отношений поля решающих правил R_3

$\delta \backslash T$	ОЭ	ГСЭ	ППЭ1	ППР1	ППЭ2	ППР2	ППЭ3	КСС
ОЗ	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД
О	УДОВЛ	УДОВЛ	УДОВЛ	НЕУД	УДОВЛ	НЕУД	УДОВЛ	НЕУД
НУЛ	ХОР	ХОР	ОТЛ	ХОР	ХОР	УДОВЛ	УДОВЛ	НЕУД
П	УДОВЛ	НЕУД	УДОВЛ	НЕУД	УДОВЛ	НЕУД	НЕУД	НЕУД
ПЗ	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД	НЕУД

ность терм-множества которой равна 3. Таким образом, предлагается использовать при расчетах поля решающих правил R_1, R_2, R_3 при следующих зафиксированных термах переменной **<сложность системы>**: "простая", "средней сложности" и "сложная", соответственно.

В табл. 5, 6, 7 в качестве примера приведен набор решающих правил, характерный для расчета надежности автоматизированных систем класса АИИС КУЭ.

Нечеткие решающие правила рассматриваются как операции над нечеткими лингвистическими переменными. В качестве примера такой операции рассмотрим нечеткий вывод по входным переменным **<срок эксплуатации>** $T = ППЭ1$, **<отключение режима>** $\delta = НУЛ$, **<сложность системы>** $N = "простая"$. При этом активируется решающее правило из поля R_1 , а нечеткий вывод будет иметь следующий вид:

$$R_1[ОТЛ, НУЛ; ППЭ_1]: \\ [\delta = НУЛ] \wedge [T = ППЭ1] \Rightarrow y = ОТЛ. \quad (1)$$

5. Формирование нечеткого логического вывода и решение задачи дефазификации

Основой для проведения операции нечеткого логического вывода, т. е. получения значения выходной переменной для заданного набора входных переменных, являются решающие правила и функции принадлежности, полученные выше в п. 3, 4. Алгоритмы нечеткого вывода различаются, главным образом, видом используемых правил, логических операций и разновидностью метода дефазификации. К настоящему времени разработаны модели нечеткого вывода Мамдани, Сугено, Ларсена, Цукamoto [2, 4]. Наиболее распространенным и прозрачным способом логического вывода в нечетких системах является модель Мамдани, суть которой заключается в следующем.

На первом шаге формирования вывода происходит фазификация входных переменных и определяются уровни отсечения для левой части каждого из активированных правил (т. е. уровни отсе-

чения функций принадлежности входных переменных):

$$\alpha_i = \min_{1 \leq j \leq n} \mu(x_j), \quad 1 \leq i \leq r, \quad (2)$$

где r — число активированных правил.

Далее находятся "усеченные" функции принадлежности выходной переменной для каждого из активированных правил на выходном фазимножестве B :

$$\mu_{B_i}(y) = \min_{1 \leq i \leq r} (\alpha_i, \mu(y)). \quad (3)$$

После этого происходит объединение всех полученных ранее усеченных функций в одну, для чего используется максимальная композиция нечетких множеств:

$$\mu_B(y) = \max_{1 \leq i \leq r} (\mu_{B_i}(y)), \quad (4)$$

где $\mu_B(y)$ — функция принадлежности итогового нечеткого множества.

Далее проводится дефазификация, т. е. генерация некоторой однозначно определенной числовой величины y , отображающей своим значением композицию нечетких подмножеств, соответствующих каждой из выходных лингвистических переменных.

В основу синтеза дефазификатора могут быть положены различные подходы. Однако наиболее эффективным, с точки зрения полноты использования априорной информации, представляется подход на основе нечеткого центрирования. При данном подходе четкое значение выходной переменной y_0 рассчитывается как горизонтальная составляющая координат центра физической массы выходного фазимножества B , распределенной в двухмерном пространстве, по следующей формуле:

$$y_0 = \frac{\int y \mu_B(y) dy}{\int \mu_B(y) dy}. \quad (5)$$

6. Апробация алгоритма метода на численном примере

В результате последовательного решения задач, рассмотренных в предыдущих разделах, сформирована процедура метода для оценивания эксплуатационной надежности, общая структура которого изображена выше на рис. 1. Реализация указанной вычислительной процедуры позволяет получить числовое значение коэффициента готовности K_T в три этапа:

1. Фазификация исходных данных в соответствии с полученными функциями принадлежности входных переменных.

2. Генерация нечетких соотношений и формирование нечеткого вывода в соответствии с полученным полем решающих правил.

3. Дефазификация полученного нечеткого вывода.

Проиллюстрируем алгоритм работы разработанного метода расчета надежности на следующем примере применительно к предметной области АИИС КУЭ в части оценивания эксплуатационной надежности уровня информационно-вычислительного комплекса электроустановки (ИВКЭ). Зададим следующие значения входных переменных: *<отклонение>* $\delta = 10\%$, *<сложность системы>* $N = 90$, *<срок эксплуатации>* $T = 6,5$ лет. Согласно данным табл. 1, 2, 3, соответственно, активируются функции принадлежности для термов входных лингвистических переменных, и в ходе фазификации получены следующие результаты:

а) по доминирующим функциям принадлежности: $\mu_{\text{НУЛ}}^{\delta}(10) = 1$;

$\mu_{\text{Сложная}}^N(90) = 0,8$; $\mu_{\text{ППЭЛ}}^T(6,5) = 0,75$;

б) по недоминирующим функциям принадлежности: $\mu_{\text{П}}^{\delta}(10) = 0$; $\mu_{\text{Средней сложности}}^N(90) = 0,2$;

$\mu_{\text{ПЛ}}^T(6,5) = 0,25$.

В соответствии с матрицами полей решающих правил, представленными в табл. 5, 6, 7, генерируются следующие нечеткие соотношения:

$$R_3[\text{ОТЛ}, \text{НУЛ}; \text{ППЭЛ}]: \\ [\delta = \text{НУЛ}] \wedge [T = \text{ППЭЛ}] \Rightarrow y_i = \text{ОТЛ}; \quad (6)$$

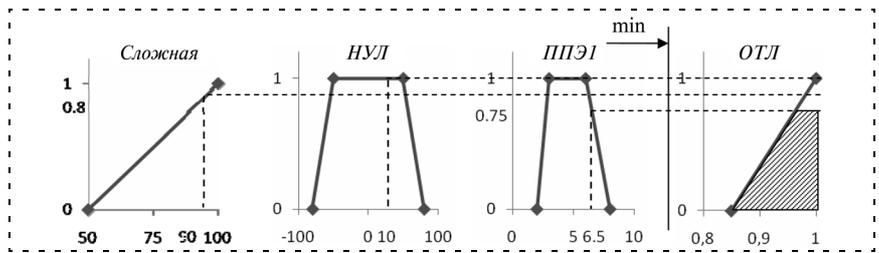


Рис. 6. Получение усеченной функции принадлежности выходной переменной по соотношению (6)

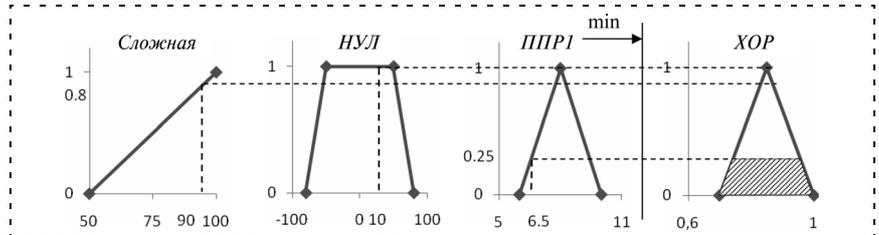


Рис. 7. Получение усеченной функции принадлежности выходной переменной по соотношению (9)

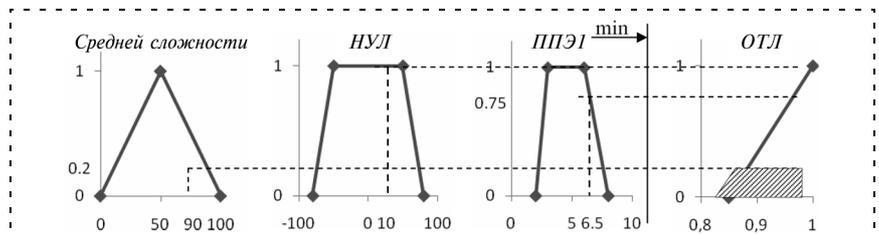


Рис. 8. Получение усеченной функции принадлежности выходной переменной по соотношению (10)

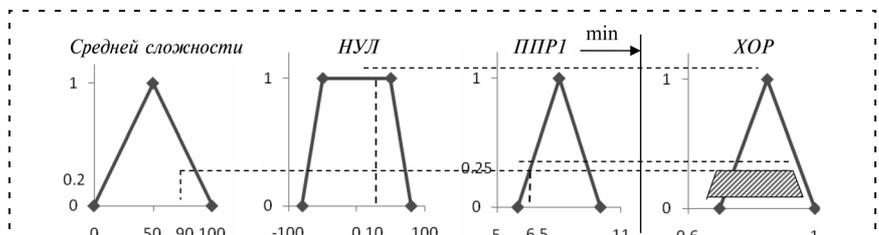


Рис. 9. Получение усеченной функции принадлежности выходной переменной по соотношению (11)

$$R_3[\text{НЕУД}, \text{П}; \text{ППЭЛ}]: \\ [\delta = \text{П}] \wedge [T = \text{ППЭЛ}] \Rightarrow y_i = \text{НЕУД}; \quad (7)$$

$$R_3[\text{УДОВЛ}, \text{П}; \text{ППЭЛ}]: \\ [\delta = \text{П}] \wedge [T = \text{ППЭЛ}] \Rightarrow y_i = \text{УДОВЛ}; \quad (8)$$

$$R_3[\text{ХОР}, \text{НУЛ}; \text{ППЭЛ}]: \\ [\delta = \text{НУЛ}] \wedge [T = \text{ППЭЛ}] \Rightarrow y_i = \text{ХОР}; \quad (9)$$

$$R_2[\text{ОТЛ}, \text{НУЛ}; \text{ППЭЛ}]: \\ [\delta = \text{НУЛ}] \wedge [T = \text{ППЭЛ}] \Rightarrow y_i = \text{ОТЛ}; \quad (10)$$

$$R_2[XOP, HUL; ППР]:$$

$$[\delta = HUL] \wedge [T = ПП] \Rightarrow y_i = XOP; \quad (11)$$

$$R_2[УДОВЛ, П; ППЭЛ]:$$

$$[\delta = П] \wedge [T = ППЭЛ] \Rightarrow y_i = УДОВЛ; \quad (12)$$

$$R_2[НЕУД, П; ППР]:$$

$$[\delta = П] \wedge [T = ПП] \Rightarrow y_i = НЕУД. \quad (13)$$

Учитывая, что $\mu_{П}^{\delta}(10) = 0$, активированные правила (7), (8), (12), (13), содержащие переменную $\delta = П$, не окажут влияния на окончательный результат (поскольку уровни усечения выходных функций принадлежности, полученные согласно этим правилам, будут равны нулю), поэтому исключим их из дальнейшего рассмотрения. Проиллюстрируем получение фазимножества выходной переменной на основе полученных соотношений. На рис. 6—9 изображены соответствующие входные и выходные усеченные функции принадлежности.

Таким образом, после объединения полученных усеченных функций принадлежности выходной переменной имеем выходное фазимножество, изображенное на рис. 10.

Расчет по формуле (6) горизонтальной составляющей координат центра физической массы полученной фигуры, распределенной в двумерном пространстве, дал значение коэффициента готовности $K_r = 0,894$.

Проведенная вычислительная процедура показала, что предложенный метод на основании данных об эксплуатации автоматизированной системы позволяет быстро и достаточно просто получить оценку ее фактической надежности. Данный факт обуславливает возможность применения метода (при его соответствующей программной реализации средствами вычислительной техники) на практике для оперативного получения информации о текущей работоспособности эксплуатируемой системы.

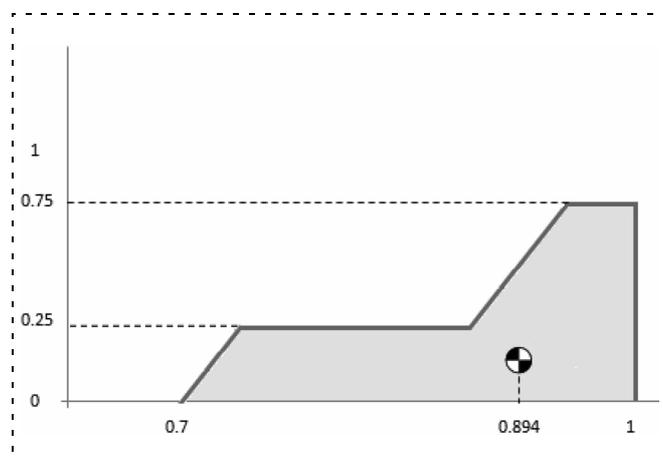


Рис. 10. Вид выходного фазимножества

Заключение

- В результате проведенного анализа определена новая область применения аппарата теории нечетких множеств — это приложение в задачах анализа надежности автоматизированных систем.
- Выделены основные факторы, влияющие на надежность автоматизированных систем: фактор длительности эксплуатации элементов системы, фактор нагрузки на элементы системы, фактор сложности структуры системы. На основании этого осуществлен переход к рассмотрению нечетких лингвистических входных (*<срок эксплуатации> T*, *<отклонение режима> δ*, *<сложность системы> N*) и выходной (*<коэффициент готовности> K_r*) переменных, определены соответствующие им терм-множества и функции принадлежности.
- Определена процедура формирования нечеткого логического вывода и способ дефазификации: предложено использовать модель нечеткого вывода Мамдани и способ дефазификации на основе нечеткого центрирования.
- Как результат выполненных разработок предложен метод оценивания эксплуатационной надежности автоматизированных систем на основе системы нечетких отношений. На числовом примере из предметной области электроэнергетики (измерение и учет потребляемой электроэнергии) проиллюстрированы возможности практического использования разработанного метода.

Список литературы

1. **Современные** проблемы надежности систем энергетики: модели, рыночные отношения, управление реконструкцией и развитием / Под ред. М. Г. Сухарева. М.: Нефть и газ, 2000.
2. **Sugeno M.** Industrial application of fuzzy control. Elsevier Science Pub. Co., 1985.
3. **Wang L.-X.** Adaptive fuzzy systems and control: design and stability analysis. Prentice Hall, 1994.
4. **Mamdani E. H. and Assilian S.** An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. 7: 1—13, 1975.
5. **McNeill F. M., Thro E.** Fuzzy Logic. Academic Press, Cambridge, MA, 1994. 293 p.
6. **Shikhin V. A.** "PRQ-regions' boarder construction via fuzzy FDM-model application with respect to Synchronous generator excitation system" // 4-th Intern. Conf. on Control of Power Systems. Editor Vesely V., Bratislava, Slovak Republic. June 15—16, 2000. P. 27—32.
7. **ГОСТ 27.002—89** "Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения".
8. **ГОСТ 18322—78** "Система технического обслуживания и ремонта техники".
9. **Приложение 11.1** к Положению о порядке получения статуса субъекта оптового рынка и ведения реестра субъектов оптового рынка "Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электрической энергии (мощности). Технические требования".
10. **CP306 3U CompactPCI Pentium® M Based CPU Board User Guide.** Manual ID: 26799, Revision Index: 03, Issue Date: February 9, 2006, 196 p.

С. А. Игнатъев, канд. техн. наук, доц.,

А. А. Игнатъев, д-р техн. наук, проф.,
Саратовский государственный
технический университет,

В. А. Иващенко, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
Институт проблем точной механики
и управления РАН, г. Саратов
iptmuran@san.ru

Автоматизированные системы мониторинга технического состояния технологического оборудования

Предложен подход к построению автоматизированных систем мониторинга технического состояния технологического оборудования промышленных предприятий, обеспечивающих принятие обоснованных решений по его текущему обслуживанию и выводу в ремонт.

Ключевые слова: автоматизированные системы, мониторинг технического состояния, технологическое оборудование, обслуживание оборудования.

Введение

Широко используемый в настоящее время на промышленных предприятиях планово-предупредительный ремонт (ППР) не обеспечивает надежного функционирования технологического оборудования (ТО). Поэтому осуществляется переход от жесткой регламентации ремонтного цикла, определенного ППР, к обслуживанию ТО по техническому состоянию.

Теория и практика построения систем диагностики технического состояния ТО находятся на начальной стадии развития. В настоящее время для мониторинга ТО, содержащего вращающиеся части, широко используется вибродиагностика [1, 2].

Помимо вибродиагностики находит применение тепловизионное обследование, обеспечивающее локализацию областей изменения температуры, свидетельствующих о нарушениях нормальных режимов функционирования ТО. Связь результатов мониторинга с реальным техническим состоянием ТО, как правило, устанавливается экспертным путем.

Однако достоверность долгосрочного прогноза дефектов в ТО только с помощью данных методов недостаточна для обеспечения своевременного обслуживания и вывода его в ремонт, а следовательно, и нормального хода технологического процесса (ТП).

1. Основные методы диагностики технического состояния технологического оборудования

Простейшим из методов диагностики ТО является *энергетический метод* (*энергетическая технология*), основанный на измерении мощности или амплитуды контролируемого сигнала. В качестве диагностических сигналов могут использоваться температура (перепад температур), давление, шум, вибрация и другие физические параметры. Данный метод строится на измерении величин сигналов в контрольных точках и сравнении их с пороговыми значениями [2].

Развитием энергетической технологии является *частотная технология*, предполагающая выделение из измеряемого сигнала составляющих в определенных частотных диапазонах и дальнейший их анализ.

Следует отметить и *фазово-временную технологию*, основанную на сравнении формы сигналов, измеренных через фиксированные промежутки времени.

Сравнение формы сигналов, но уже с эталонной формой, можно осуществлять с помощью *спектральной технологии*, использующей узкополосный спектральный анализ сигналов [2]. При этом диагностическая информация содержится в соотношении амплитуд и начальных фаз основной и каждой из кратных ей по частоте составляющих сигнала. Эта технология широко применяется для анализа сигналов с датчиков давления, вибрации, шума, а также с датчиков тока и напряжения в электрических машинах и аппаратах.

В 1968 г. специалистами Швеции был запатентован *метод (технология) ударных импульсов*. Метод основан на том, что вибрация, возбуждаемая короткими импульсами, значительно изменяет мгновенную (пиковую) амплитуду сигнала, практически не влияя на ее среднеквадратическое значение (мощность). Отношение пикового значения сигнала к среднеквадратическому, называемое *пикфактором*, является тем параметром, который реагирует на появление отдельных коротких импульсов.

Однако необходимость решения более сложных диагностических задач явилась основной причиной поиска новых, более совершенных технологий. В частности, необходимо было расширить номенклатуру обнаруживаемых дефектов, в том числе и тех, при которых в диагностируемых узлах не возникают ударные импульсы. Не менее важно было минимизировать вероятность пропуска опасных ситуаций при выполнении периодических измерений с большими перерывами между ними.

Метод ударных импульсов не позволяет увеличить эти интервалы до 5...10 дней. Это обусловлено тем, что именно на такой минимальный срок в начале развития дефектов возрастает значение пикфактора. При дальнейшем росте дефектов из-за увеличения числа ударных импульсов в единицу времени значение пикфактора уменьшается, в то время как уровень вибрации продолжает расти.

В 1978 г. была предложена *технология огибающей* [2], которая в настоящее время широко используется во многих странах. Это обусловлено особенностями анализа колебаний мощности измеряемого сигнала. Эта технология может применяться для высокочастотного сигнала, мощность которого изменяется значительно медленнее его периода.

Однако достоверность *долгосрочного прогноза* технического состояния ТО в целом с помощью только указанных методов диагностики низка. Поэтому эти методы используют в различных комбинациях и в сочетании с методами контроля физических параметров, например, температуры отдельных узлов ТО. Это позволяет несколько повысить эффективность диагностирования.

Для дальнейшего повышения эффективности диагностики технического состояния ТО предлагается подход, основанный на функциональном объединении функций контроля технического состояния оборудования и качества изделий, изготавливаемых на нем.

2. Обобщенный алгоритм мониторинга технического состояния технологического оборудования

В основу предложенного подхода к распознаванию технического состояния ТО положен обобщенный алгоритм мониторинга (рис. 1) [3].

Информация, содержащаяся в информационной системе (ИС) мониторинга, используется для определения состава и численных значений:

- характеристик технического состояния ТО (границ частотных диапазонов и температурных полей, соответствующих нарушениям нормальных режимов работы ТО; частот, на которых наблюдаются выбросы, и амплитуд выбросов в спектре огибающей вибрационного спектра; точек пространства, в которых имеют место нарушения температурных режимов работы ТО, и значений температур в этих точках и др.);
- параметров качества изделий (например, шероховатости, некруглости и волнистости на финишных стадиях металлообработки).

На основе этой информации выполняется классификация и распознавание аномальных состояний

ТО, построение математических моделей, отражающих связь между диагностическими признаками и параметрами технологического режима работы ТО.

Информационная система помимо данных о параметрах качества изделий и характеристик технического состояния ТО содержит информацию (знания) о не формализуемых и слабо формализуемых ситуациях, возникающих в процессе функционирования оборудования, которая используется в качестве дополнительной при принятии решений о необходимости вывода оборудования в ремонт.

Эта информация заносится в базу знаний (БЗ) экспертной системы (ЭС) технического обслуживания и ремонта оборудования оператором-экспертом, в качестве которого выступает технолог того производственного подразделения, в котором размещается ТО.

Первым этапом построения ЭС является реализация системы сбора, обработки и формализованного представления априорной информации, т. е. создание баз данных и знаний системы.

В предложенной системе базы данных (БД) эталонных вейвлет-спектров формируются по нескольким группам эталонов, соответствующих исправным узлам ТО, начальным стадиям зарождения и развития дефектов в них.

Первая группа эталонов формируется по результатам экспериментов с исправным ТО, в ходе которых осуществляется измерение сигналов, и они заносятся в БД. Определение эталонов второй группы происходит на основе экспериментов с ТО, находящимся на начальной стадии развития дефекта. В ходе экспериментов проводится постоянное сопоставление спектров сигналов испытываемого ТО с соответствующими эталонными спектрами исправного ТО. При появлении отклонений в спектрах эксперименты прекращаются, классифицируется развивающийся в ТО дефект, информация о котором помещается в БД. Третья группа эталонов создается на основе экспериментов с неисправным ТО или с искусственно созданными дефектами его отдельных узлов. Данная информация также заносится в БД.

Следующим этапом построения ЭС является ее обучение, т. е. наполнение БЗ знаниями, проверка на непрерывность, непротиворечивость и полноту знаний, содержащихся в базе правил.

При построении БЗ большое значение следует уделять моделям представления знаний, ускоряющим работу ЭС, более совершенным процедурам вывода на множестве продукционных правил.

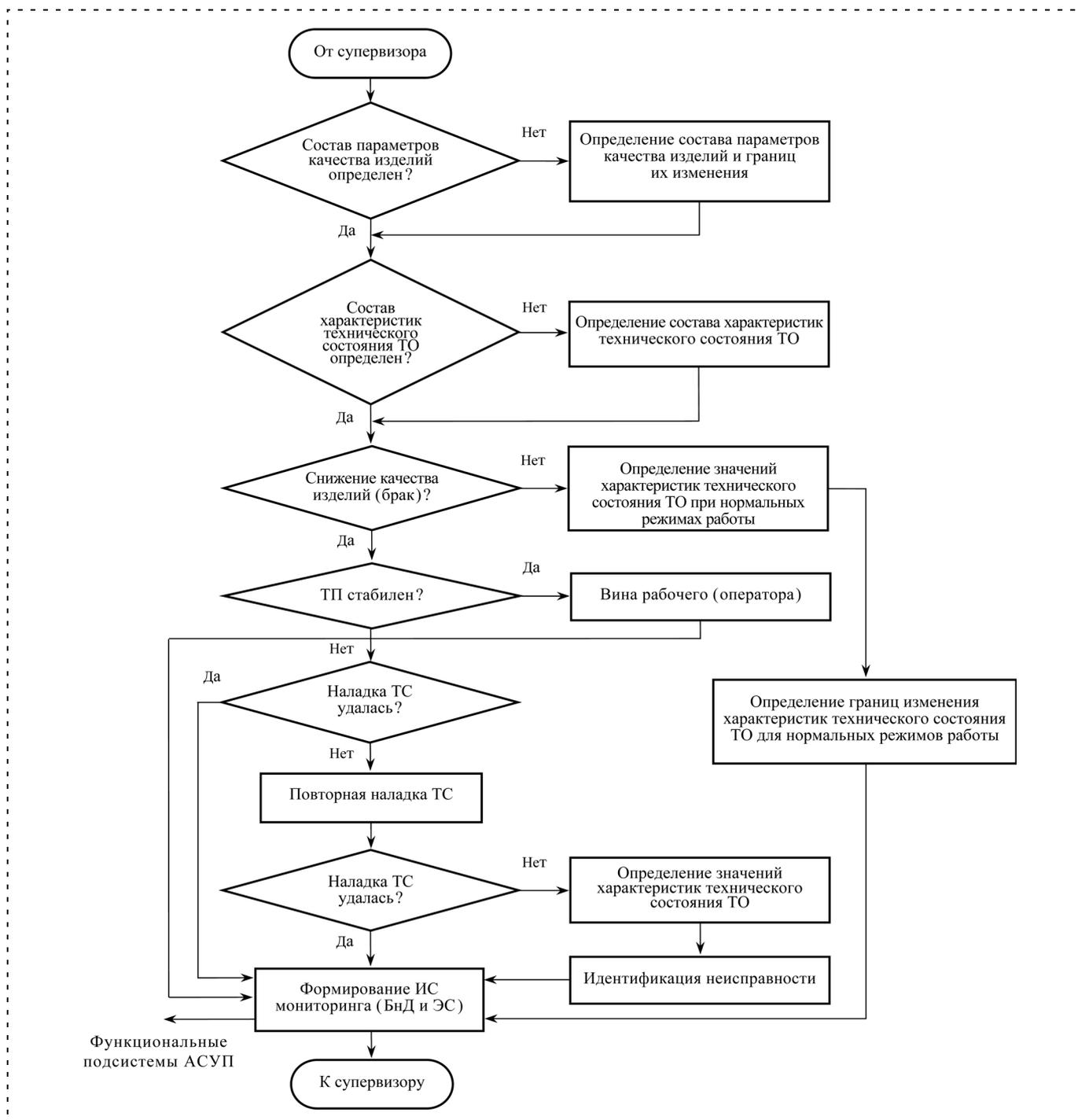


Рис. 1. Обобщенный алгоритм мониторинга технического состояния технологического оборудования:
ТС — технологическая система; БД — банк данных

Рассмотренный алгоритм мониторинга расширяет функциональные возможности действующих в настоящее время EAM-систем: iMaint EAM (компания DP Solutions, Inc., США), IFS Applications (компания IFS, Швеция), Mincom Ellipse (Mincom Limited, Австралия), Global-EAM (компания "Бизнес Технологии", Россия) и др.

3. Система мониторинга на примере обработки деталей подшипников

Реализация предложенного алгоритма мониторинга технического состояния ТО предполагает мониторинг ТП, от которого, в первую очередь, зависит качество изготавливаемой продукции.

При обработке деталей подшипников предъявляются высокие требования к геометрической точ-

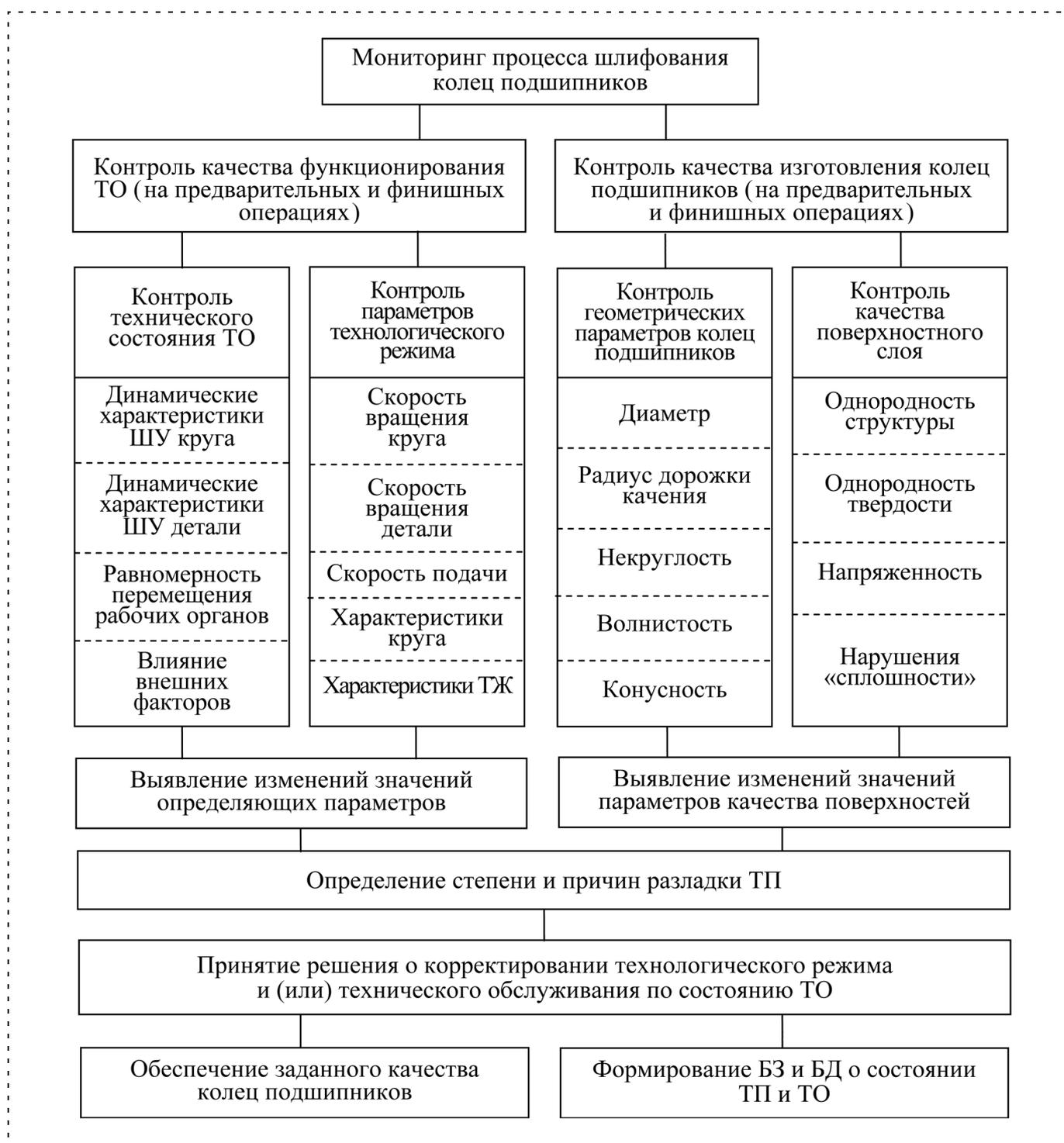


Рис. 2. Структура системы мониторинга ТП шлифования колец подшипников

ности и физико-механическим свойствам их поверхностей, которые определяются параметрами ТП, в том числе выбранным режимом резания и динамическим состоянием ТО. Наиболее ответственным этапом, определяющим качество подшипников, является процесс шлифования колец [3].

Структура системы мониторинга ТП шлифования колец подшипников приведена на рис. 2.

Контроль качества функционирования станков.

Этот контроль непосредственно связан с ходом ТП, определяющего качество шлифования и включающего макро- и микрогеометрические параметры точности и физико-механические свойства поверхностного слоя обрабатываемых колец подшипников.

Размеры колец и профиль дорожек качения определяются точностью формообразующих переме-

щений рабочих органов станков, базирования заготовки и профиля шлифовального круга.

Необходимая точность перемещения и закон изменения скорости подвода круга обеспечиваются современными системами приводов, а вращения шпинделей — их статической и динамической балансировкой. Однако возникает необходимость в периодическом контроле уровня их вибраций в диапазоне частот до 1 кГц, оказывающих влияние на волнистость дорожек качения [4].

Качество обработки при шлифовании во многом определяется уровнем и спектром относительных колебаний абразивного круга и заготовки. Наиболее мощным источником вибраций в зоне резания является дисбаланс круга, непрерывно изменяющийся во время обработки и вызывающий вынужденные колебания на частоте вращения и кратных ей частотах. Скорость изменения дисбаланса круга непосредственно связана с интенсивностью процесса обработки и особенностями подачи технологической жидкости (ТЖ).

Существенное влияние оказывают дефекты изготовления и сборки шпиндельных узлов (ШУ), а также неравномерность режущих свойств инструмента. Часто дисбаланс абразивного круга и неравномерность режущих свойств инструмента оказываются взаимосвязанными.

Периодичность измерений задается с учетом значений параметров качества обработанных деталей. При выходе значений этих параметров за установленные границы проводятся измерения вибраций основных формообразующих узлов станка и реализуются процедуры диагностирования [5].

Контроль качества изделий. Эксплуатационные характеристики подшипников существенно зависят от качества дорожек качения колец, формируемого на операциях шлифования и суперфиниширования. Поэтому важное значение приобретает контроль неоднородности структуры поверхностного слоя дорожек. Для осуществления этого контроля используется вихретоковый метод, ориентированный на выявление различных дефектов в поверхностном слое дорожек качения (прижоги, трещины, неравномерность твердости и др.).

Специально проведенные эксперименты позволили установить допустимые граничные значения определяющих параметров динамического состояния станка и сигналов вихретокового датчика. Это позволило выделить предполагаемые причины дефектов и оценить способы корректировки процесса обработки деталей на данном станке, а затем принять решения по изменению технологического режима обработки деталей или подналадки станка.

Указанное обстоятельство позволило практически исключить причины возникновения прижогов, повысить долговечность колец и, соответственно, улучшить эксплуатационные характеристики подшипников. Внесение соответствующей информации в БЗ и БД способствует организации гибкого технического обслуживания и ремонта станков. На основе сопоставительного анализа данных о состоянии ТП и качестве колец подшипников оцениваются степень и возможные причины разладки ТС на конкретном станке, и при негативных результатах проводится подналадка или ремонт элементов ТС.

Таким образом, внедрение систем мониторинга технического состояния ТО на промышленных предприятиях направлено на обеспечение правильного построения ТП и на поддержание нормального технического состояния ТО.

Заключение

Предложен новый подход к построению автоматизированных систем мониторинга технического состояния технологического оборудования промышленных предприятий, в основу которого положено объединение функций контроля технического состояния оборудования и качества изделий, изготавливаемых на нем.

Данный подход позволяет повысить оперативность и достоверность оценки технического состояния оборудования, а также обеспечить принятие своевременных и обоснованных решений по его обслуживанию и выводу в ремонт и по оперативной корректировке маршрутов технологических процессов, вызванной неисправностью технологического оборудования.

Список литературы

1. **Baines N.** Modern vibration analysis in condition monitoring // Noise and vibration control worldwide. 1987. V. 18. № 5. P. 151—159.
2. **Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев Ю. А.** Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: Учеб. пособ. СПб.: Питер, 2000. 158 с.
3. **Мониторинг** качества изготовления изделий прецизионного машиностроения / А. А. Игнатъев, В. А. Иващенко, В. В. Горбунов и др. // Высокие технологии — путь к прогрессу. Сб. науч. тр. Саратов: Научная книга, 2003. С. 179—185.
4. **Игнатъев А. А.** Идентификация динамических характеристик станков как один из этапов мониторинга технологической системы // Исследования станков и инструментов для обработки сложных и точных поверхностей. Межвуз. науч. сб. Саратов: Изд. Сарат. гос. техн. ун-та, 2002. С. 62—69.
5. **Контроль** в системах автоматизации технологических процессов / А. А. Игнатъев, М. В. Виноградов, В. А. Добряков и др. Саратов: Изд. Сарат. гос. техн. ун-та, 2001. 124 с.

УДК 004.93

В. А. Князь¹, нач. лаб.,
В. Ф. Крыченков², врач-офтальмолог,
И. А. Матвеев³, канд. физ.-мат. наук, зав. сектором,
А. Б. Мурынин³, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Е. Б. Салтыкова¹, инженер 2-й категории,

¹ Государственный институт авиационных систем

² Медицинский центр МЕДСИ-2

³ Вычислительный центр РАН

им. А. А. Дородницына

amurynin@bk.ru

Диагностика патологий зрения человека по антропометрическим данным лица методами технического зрения

Рассматривается проблема автоматизации диагностики патологий зрения человека с использованием технологии компьютерного стереозрения. Проведен анализ нескольких алгоритмов оценки асимметрии лица. Исследована зависимость между мерами асимметрии и данными медицинской диагностики. Описывается аппаратно-программный комплекс, разработанный для решения поставленной задачи.

Ключевые слова: стереоскопическое зрение, техническое зрение, стереорекострукция, диагностика патологий зрения, антропометрия лица.

Детализация задач исследований

Разработка автоматизированных компьютерных систем для прогнозирования и профилактики патологий зрения стала возможной благодаря развитию цифровых технологий. Перспективным направлением является использование трехмерной модели лица человека, измеряемой с помощью системы компьютерного зрения [1, 2]. В основе такого подхода лежит взаимосвязь между нарушениями стереозрения человека и наличием асимметрии лица. Исследования последних лет показали, что билатеральная симметрия глазниц черепа может стать основной причиной возникновения косоглазия, астигматизма, близорукости и других патологий зрения [2, 3]. Иными словами, структурная асимметрия вызывает как следствие функциональную асимметрию. Это сделало возможным создание ме-

тодов, позволяющих проводить объективную оценку предрасположенности к косоглазию и другим патологиям зрения путем измерения рельефа лица с помощью высокоточной системы трехмерного компьютерного зрения [4].

Возможность получения объективной оценки особенно важна при обследовании младенцев по следующим причинам. Существующие методы диагностики в офтальмологии, как правило, не позволяют предсказать развитие некоторых патологий при обследовании младенцев. (Количественные и качественные параметры зрения человека в медицинской практике проверяются в основном по словесным (вербальным) ответам пациентов, а младенцы не способны давать такие ответы по объективным причинам.) Прогнозирование заболеваний в раннем возрасте позволяет провести своевременные профилактические мероприятия и лечение с большей вероятностью успеха. Если на большинство параметров зрения можно воздействовать медицинскими и оптическими методами, восстанавливая или улучшая их в любом возрасте, то корректировать стереоскопическое зрение можно только до определенного детского возраста. При этом лечение тем труднее и продолжительнее, чем старше ребенок, и ограничивается возрастом 7...10 лет.

Чтобы оценить связь асимметрий глазниц с другими патологиями зрения, необходима статистическая достоверность и высокая точность проводимых измерений. Ошибка в измерениях координат значимых точек не должна превышать 0,5 мм. Значимые точки — это левая и правая надбровные точки, левая и правая подглазничные точки, точка на середине переносицы, точка кончика носа и две пары точек в углах глаз справа и слева. Исследования, проведенные ранее, позволили сделать следующие предварительные выводы о существовании связи между асимметрией черепа и патологиями зрения [2, 3]:

- при грубых нарушениях симметрии глазниц всегда возникает патология зрения, а именно — непременное двоение и косоглазие;
- значительная асимметрия черепа является одной из причин астигматизма.

Поскольку асимметрия костной структуры черепа в той или иной степени отображается в асиммет-

рии трехмерной поверхности лица, для диагностики могут использоваться ее характеристики, восстанавливаемые по данным, получаемым от системы технического зрения. Точность в 0,5 мм по измерению глубины ключевых точек лица, которая необходима для эффективной диагностики, достижима для современных систем компьютерного зрения [4, 5]. Таким образом, становится возможным создание автоматических и полуавтоматических систем диагностики, основанных на методах компьютерного зрения.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка аппаратно-программного комплекса, позволяющего на основе дистанционно измеряемых антропометрических характеристик проводить автоматизированную диагностику патологий зрения. Для достижения этой цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Должен быть разработан алгоритм оценки асимметрии лица по стереоизображениям поверхности лица, получаемым системой технического зрения. Алгоритм должен работать в автоматическом или полуавтоматическом режиме с минимальным участием оператора, так как для практического применения в медицинской практике требуется получение результатов в реальном масштабе времени.

2. Должна быть разработана методика принятия решения о наличии либо отсутствии патологии зрения по измеренным антропометрическим характеристикам. При разработке методики должна быть учтена достаточно представительная статистическая выборка. Методика должна использовать указанный выше модифицированный алгоритм оценки асимметрии лица.

3. Чтобы оценить связь асимметрий глазниц с патологиями зрения, необходима статистическая достоверность и высокая точность проводимых измерений. Для этого должны быть собраны и проанализированы данные о значительном числе пациентов, причем результаты измерений должны сопровождаться медицинской диагностикой с привлечением опытных врачей-офтальмологов.

Метод измерения асимметрии лица

Для оценки асимметрии лица используется набор антропометрических точек, показанных на рис. 1. При этом важную роль играет уточнение антропометрических точек с использованием как текстурного изображения лица, так и точной

трехмерной поверхности лица, восстановленной по данным стереосъемки (рис. 2).

Поскольку исходная трехмерная модель неидеальна (погрешности — до 0,5 мм), возникает необходимость уточнять координаты точек, как вы-

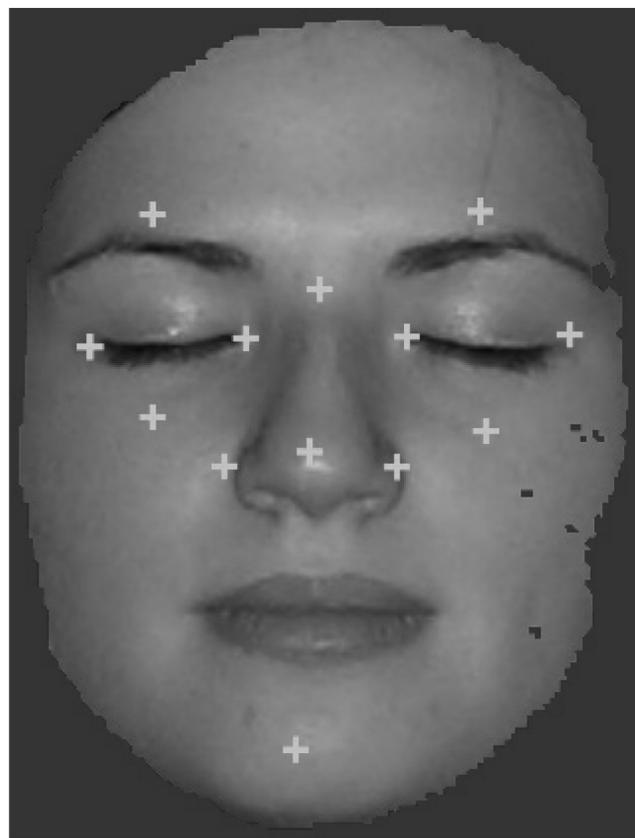


Рис. 1. Антропометрические точки, используемые алгоритмами

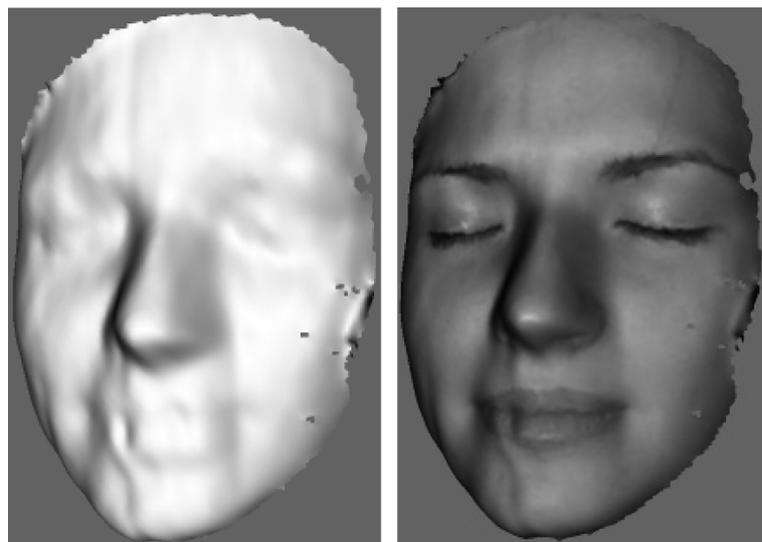


Рис. 2. Сетчатое (слева) и текстурированное (справа) представления трехмерной модели лица

деленных оператором-человеком, так и полученных автоматически. Это делается на основании анализа окрестности точки. Используются два метода уточнения: линейной и квадратичной аппроксимации. Для различных точек лица целесообразно применять различные методы уточнения:

- для каждой точки выполняется линейная аппроксимация в ее трехмерной окрестности. Глубина точки корректируется в соответствии с полученной аппроксимацией;
- для внутриглазных точек выполняется поиск на трехмерной модели наиболее "углубленной" точки (соответствующей впадине между переносицей и глазами). Координаты X, Y, Z точек корректируются с учетом этого поиска;
- для точек переносицы и носа выполняется поиск на трехмерной модели наиболее "выступающей" точки (по координате Z). Координаты X, Y, Z точек корректируются с учетом этого поиска.

На основе набора антропометрических точек строятся следующие плоскости:

- плоскость A — "фронтальная" плоскость лица;
- плоскость B — "сагиттальная" плоскость, перпендикулярная фронтальной и разделяющая лицо на левую и правую половину с наибольшей степенью симметрии. Эта же плоскость в терминах, введенных далее, называется "билатеральной";
- плоскость C — "горизонтальная" плоскость, перпендикулярная плоскостям A и B и проходящая через переносицу.

Примеры построенных плоскостей показаны на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Разности расстояний антропометрических точек левой и правой половин лица до плоскостей A, B, C представляют собой простейшие оценки меры асимметрии лица. Для практической реализации метода важен алгоритм автоматического определения плоскостей A, B, C . Приведем описание этого алгоритма.

Билатеральной плоскостью фигуры Φ (в дальнейшем термин "фигура" обозначает участок трехмерной поверхности лица, восстановленный по изображениям) назовем плоскость, относительно которой асимметрия этой фигуры минимальна. В физическом (трехмерном евклидовом) пространстве плоскость может быть задана через нормаль n и сдвиг d как множество точек, удовлетворяющих уравнению

$$(u, n) = d,$$

где u — вектор, определяющий произвольную точку фигуры Φ . Для произвольной точки u симметрич-

ная ей относительно этой плоскости точка u' задается как

$$u' = u + 2n \frac{d - (u, n)}{n^2} = u + 2(d - (u, n))n,$$

с учетом того, что нормаль к плоскости является единичным вектором. Строгая билатеральная симметрия может быть определена следующим образом: все точки, принадлежащие фигуре, при симметричном отображении переходили в точки, также принадлежащие фигуре:

$$\forall u \in \Phi \quad u' \in \Phi.$$

Для определения нестрогой симметрии используем расстояние от точки и до фигуры

$$\rho(u, \Phi) = \min_{v \in \Phi} \|u - v\|,$$

т. е. минимальное расстояние от заданной точки, принадлежащей фигуре, и меру билатеральной асимметрии (невязку симметрии)

$$Q = \int_{u \in \Phi} \rho(u', \Phi) d\Phi.$$

Тогда билатеральной плоскостью является плоскость, минимизирующая Q . Лицо в системе представлено как однолистовая, связная, ограниченная, непрерывная, замкнутая поверхность. Примем во внимание, что в системе координат камеры эта поверхность — однозначная функция, описывающая зависимость высоты (или удаленности) точки от двух других координат: $z = z(x, y)$ на некоторой области $\Omega = \{(x, y)\}$. Поэтому для практических целей более удобно другое определение невязки симметрии как объема пространства, заключенного между поверхностью $z(x, y)$ и ее отражением $z'(x, y)$ относительно билатеральной плоскости. Представив этот объем как интеграл расстояния между поверхностью и ее отражением на области определения поверхности, получим

$$Q = \int_{\Omega} |z(x, y) - z'(x, y)| dx dy. \quad (1)$$

Однако здесь необходимо учесть, что не для всех точек отражения могут существовать точки исходной поверхности, имеющие такие же абсциссу и ординату, и наоборот, не каждая точка исходной поверхности перекрывается отражением. Для каждой точки (x, y) из двумерной области Ω определения поверхности существует точка $(x, y, z(x, y))$ в пространстве. Для этой точки всегда определено ее

отражение относительно плоскости: $(x, y, z(x, y))' = (x', y', z'(x, y))$. Таким образом, задается преобразование $(x, y) \rightarrow (x', y')$ для точек из Ω , а также и преобразование самой области $\Omega \rightarrow \Omega'$. На пересечении этих областей $\Omega_{AND} = \Omega \cap \Omega'$ заданы и поверхность, и ее отражение, а на множестве $\Omega_{XOR} = (\Omega \cup \Omega') \setminus (\Omega \cap \Omega')$ задана только одна из них. Для этого последнего случая можно рассчитывать качество как расстояние не до точки отражения (которой нет), а до некоторой плоскости $z = C = \text{const}$ (рис. 4).

Тогда формула (1) может быть переписана в виде

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3;$$

$$Q_1 = \int_{\Omega \cap \Omega'} |z(x, y) - z'(x, y)| dx dy;$$

$$Q_2 = \int_{\Omega \setminus \Omega'} |z(x, y) - C| dx dy;$$

$$Q_3 = \int_{\Omega' \setminus \Omega} |C - z'(x, y)| dx dy.$$

Невязка зависит от параметров плоскости симметрии: $Q = Q(n, d)$. Для ее минимизации применяется алгоритм анилинга или градиентного спуска. Начальное приближение плоскости — плоскость с нормалью, направленной вдоль оси OX , проходящая через переносицу (эта точка определяется при предварительной обработке изображения). Также возможно использовать прямой перебор параметров в некоторой окрестности начального приближения по сетке с заданным шагом.

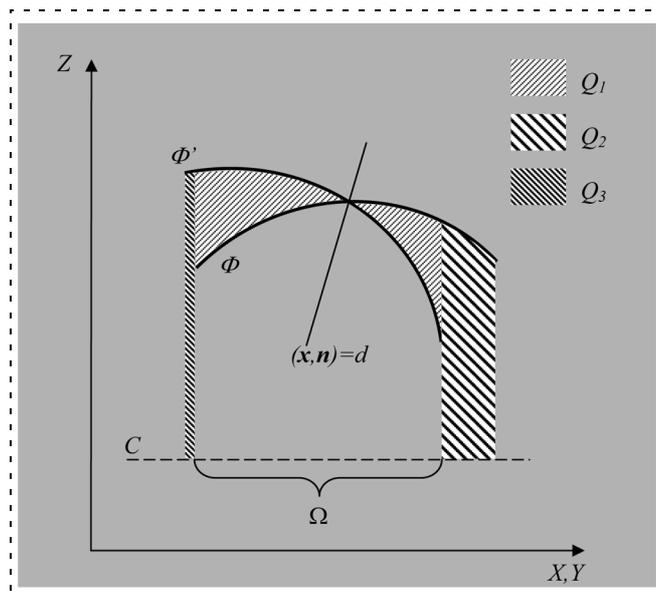


Рис. 4. Иллюстрация к расчету невязки симметрии

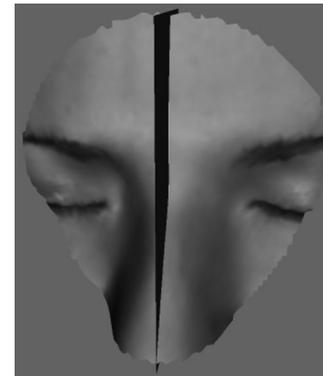


Рис. 5. Плоскость B (сагиттальная), построенная путем минимизации асимметрии относительно переносицы

Поверхность лица при решении поставленной задачи представлена в виде триангуляции — набора трехмерных точек и набора троек этих точек (т. е. треугольников). Совокупность этих треугольников есть однолистовая, связная, ограниченная, непрерывная, замкнутая поверхность. Имеются два способа практического вычисления качества для поверхности $z(x, y)$, заданной таким образом:

- численное интегрирование по сетке точек с постоянным шагом, выбранным таким образом, чтобы на каждый треугольник разбиения приходилось не менее одной точки сетки;
- построение общей триангуляции [6].

В описываемой версии системы использован первый подход, который более прост алгоритмически, но требует большего объема вычислений. Минимизируя невязку $Q = Q(n, d)$, находим n, d , которые определяют оптимальное положение плоскости. Это положение и соответствующие меры асимметрии используются в дальнейших расчетах.

Описанный метод используется для нахождения оптимального положения сагиттальной плоскости лица и оценки асимметрии расположения антропометрических точек относительно этой плоскости. Пример сагиттальной плоскости, найденной этим методом, приведен на рис. 5.

Исследование связи асимметрии лица с патологиями зрения

Для исследований было привлечено 78 пациентов, среди которых около половины по предварительным данным имело ту или иную форму патологии зрения. Было проведено сканирование и построение 3D-моделей лица с помощью лабораторного макета системы стереоскопического технического зрения.

Оценку асимметрии лица проводили следующим образом.

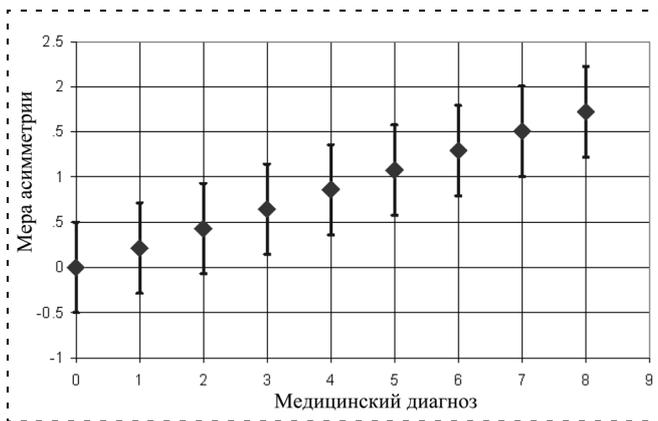


Рис. 6. Зависимость меры асимметрии лица от медицинского диагноза

1. Автоматически определяли положение плоскостей *A*, *B*, *C* методом, описанным выше.
2. Выполняли операторскую разметку антропометрических точек, при которой человек-оператор в интерактивном режиме определял и вводил в компьютер местоположение видимых окологлазных антропометрических точек с наибольшей возможной точностью.
3. Выполняли полуавтоматическую разметку антропометрических точек, при которой уточняли координаты антропометрических точек путем ана-

лиза трехмерной окрестности грубой первоначальной операторской разметки.

4. Мету асимметрии определяли усреднением разности расстояний окологлазных антропометрических точек левой и правой половин лица относительно фронтальной (*A*), сагиттальной (*B*) и горизонтальной (*C*) плоскостей. При этом использовали как координаты, полученные при точной операторской разметке, так и координаты, полученные в полуавтоматическом режиме.

Одновременно проводили медицинскую диагностику этих пациентов врачом-офтальмологом. Медицинский диагноз представляли условно в виде оценки, которая могла варьироваться в диапазоне от 0 до 10 в зависимости от наличия патологий зрения. Затем проводили обработку данных по описанной методике, вычисляли различные версии оценок асимметрии и строили линейную регрессию зависимости асимметрии от медицинского диагноза. Пример такой зависимости показан на рис. 6.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность диагностики патологий зрения по дистанционно измеряемым антропометрическим данным с использованием компьютерного стереоскопического зрения. Полученные результаты свидетельствуют о наличии статистической связи

между измеренными характеристиками асимметрии поверхности лица и медицинскими диагнозами, поставленными при обследовании пациентов врачом-офтальмологом.

Таким образом, применение систем трехмерного технического зрения позволяет получить оценки асимметрии лица для диагностики возможных патологий зрения. В связи с этим актуальна разработка таких систем, ориентированных на антропометрическое исследование лица человека. Пример такой разработки описан ниже.

Аппаратно-программный комплекс для дистанционной диагностики патологии зрения

На основе опыта проведенных исследований был создан аппаратно-программный комплекс, представляющий собой макет системы для дистанционной диагностики патологий зрения. На рис. 7 приведена схема такой системы. Принципы работы блоков антропометрии и расчета асимметрии лица описаны выше. Работа блока диагностики (классификатора) основана на рассмотрен-

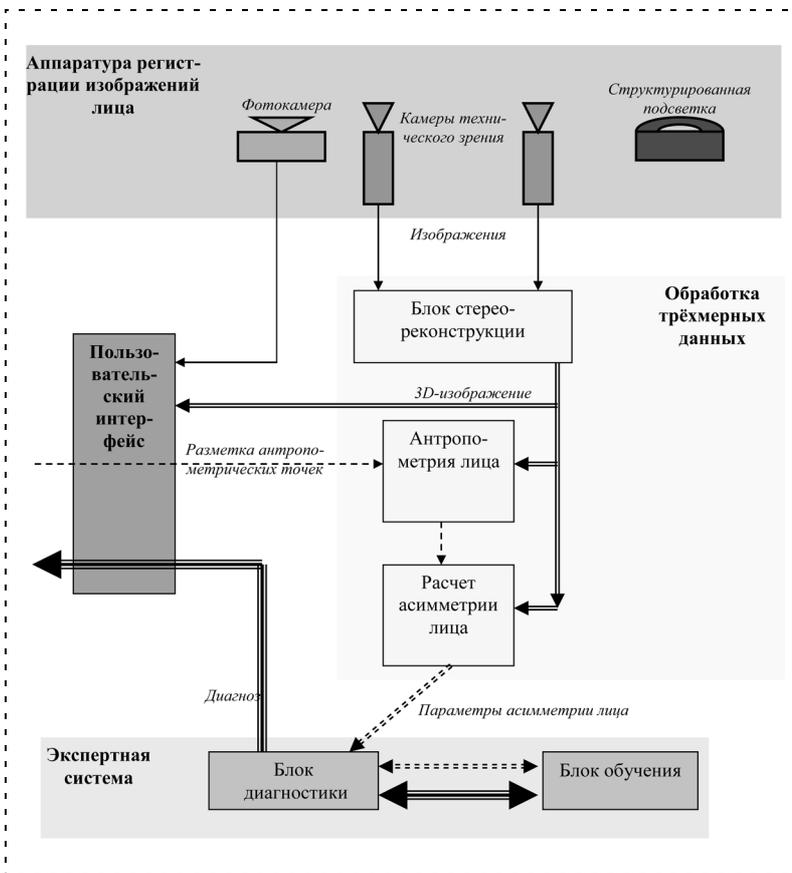


Рис. 7. Схема макета системы

ной в предыдущем разделе взаимосвязи между асимметрией лица и медицинскими диагнозами. Функционирование блока обучения состоит в обработке имеющейся базы экспериментальных данных в целях настройки классификатора в блоке диагностики. Пользовательский интерфейс системы реализован на стандартном персональном компьютере. Ниже приведено описание аппаратной части комплекса.

В разработанном комплексе используется фотограмметрическая система бесконтактных измерений и построения трехмерной текстурированной модели лица человека. Система бесконтактных измерений включает:

- две камеры для технического зрения, предназначенные для захвата черно-белых изображений человека в структурированном свете и расчета трехмерных координат поверхности лица;
- цветную фотокамеру высокого разрешения для получения цветного изображения и фотореалистичного текстурирования трехмерной модели;
- портативный DLP-проектор для создания ПК-управляемого подсвета, обеспечивающего автоматизацию решения задачи стереоотождествления;
- персональный компьютер.

Внешний вид системы бесконтактных измерений для анализа асимметрии лиц показан на рис. 8.

Предварительным этапом работы с фотограмметрическим комплексом бесконтактных измерений является калибровка [5], т. е. оценка параметров модели камер. Калибровка выполняется с применением специального тестового объекта (рис. 9, а). Результаты калибровки используются при последующей стереосъемке лиц. Трехмерные координаты точек поверхности лица вычисляются путем стереоотождествления точек левого и правого изображений (рис. 9, б) [7, 8].



Рис. 8. Внешний вид системы бесконтактных измерений для анализа асимметрии лиц

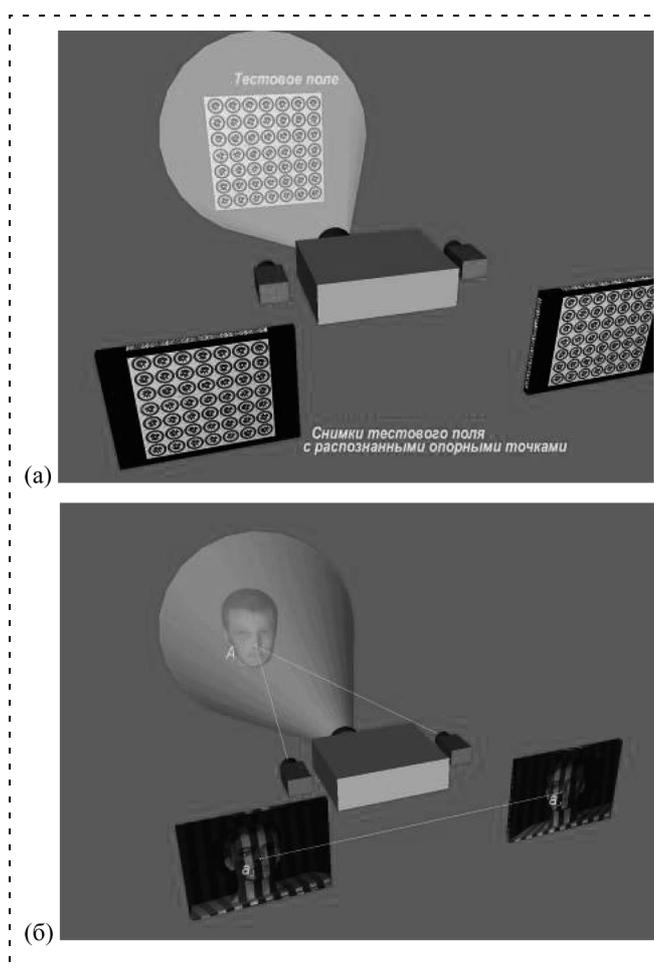


Рис. 9. Функционирование системы:

а — система в режиме калибровки и ориентирования с использованием тестового объекта; б — лицо и его разноракурсные изображения на двух камерах с подсветкой объекта структурированным светом

Для автоматизированного решения задачи стереоотождествления соответственных точек изображений с левой и правой камеры в системе применяется оригинальный кодированный подсвет объекта, минимизирующий число кадров, использующихся для расчета трехмерных координат поверхности объекта, при сохранении высокой плотности измерений. Данный подход позволяет обеспечить время съемки на уровне примерно 0,5 с.

Основные технические характеристики разработанной системы:

Время сканирования, с	0,5
Время расчета трехмерной модели, с	5
Плотность измерения координат, точек на мм ²	10—25
Точность измерения пространственных координат, мм	0,5

Выполняются следующие функции:

- сканирование и получение необходимого числа снимков лица пациента для последующего ис-

пользования при построении трехмерной модели лица;

- построение высокоточной трехмерной модели лица;
- текстурирование полученной трехмерной модели.

Для расчета трехмерных координат поверхности используются последовательности снимков с черно-белых камер, а в качестве текстуры служит цветной снимок высокого разрешения, получаемый с цифрового фотоаппарата. На рис. 10 (см. третью сторону обложки) показана система бесконтактных измерений в процессе обследования пациента для измерений асимметрии лица. Процедура обследования достаточно комфортна для пациента и занимает около одной минуты времени.

Полученные результаты наглядно показали возможность оценки патологии зрения путем вычисления меры асимметрии лица по трехмерной модели лица. Тем не менее, для уточнения оценок зависимости между патологиями зрения и асимметрией черепа целесообразно проводить дальнейшие экспериментальные исследования с привлечением большего числа пациентов с различными формами патологии зрения. Также целесообразно проводить усовершенствование аппаратного комплекса с учетом полученных экспериментальных данных.

1. Murynin A. B., Krychenkov V. F., Matveev I. A., Kuznetsov V. D. Estimation of Bilateral Facial Symmetry Deviation Using a Stereoscopic Computer Vision System // Pattern Recognition and Image Analysis. 2001. Vol. 11. N 2. P. 350—352.
2. Murynin A. B., Knyaz V. A., Matveev I. A. Applying computer stereo vision algorithms for study of correlation face asymmetry and human vision pathology // Proc. of 9-th Internat. Conf. on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information technologies. Nizhni Novgorod, 2008. V. 1. P. 301—304.
3. Князь В. А., Крыченков В. Ф., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Салтыкова Е. Б. Исследования корреляций между асимметриями лица и патологиями зрения человека методами трехмерного моделирования // Тр. Ин-та системного анализа РАН. Динамика неоднородных систем. 2007. Т. 11. С. 223—228.
4. Желтов С. Ю., Визильер Ю. В., Ососков М. В., Каратеев С. Л., Бекетова И. В. Автоматическое выделение на цветных цифровых изображениях лица человека и его характерных черт // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. № 10. С. 2—7.
5. Князь В. Автоматизированная техника для фотограмметрической системы на базе мультимедийного проектора и камеры CCD // Proc. of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology' 2006. V. XXXVI. P. 5.
6. Дышкант Н. Ф., Местецкий Л. М. Сравнение однолистных поверхностей, полученных при 3D сканировании // Graphicon'08, Москва 23—27 июня 2008.
7. Матвеев И. А., Мурынин А. Б. Идентификация объектов по стереоизображениям. Оптимизация алгоритмов восстановления поверхности // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1998. № 3. С. 149—155.
8. Мурынин А. Б. Автоматическая система распознавания личности по стереоизображениям // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1999. № 1. С. 106—114.

УДК 616.127-07

З. И. Баусова, канд. техн. наук, доц.,

О. Н. Бодин, д-р техн. наук, проф.,

А. А. Востриков, аспирант,

Пензенский государственный университет

bodin_o@inbox.ru

Использование моделирования периодики Венкебаха для оценки степени тренированности сердца

Рассмотрено моделирование условий возникновения аритмии сердца. Обсуждается определение условий возникновения аритмии Венкебаха по результатам анализа электрокардиосигнала.

Ключевые слова: анализ электрокардиосигнала, периодика Венкебаха, тренированность сердца.

Введение

Важным диагностическим показателем сердечно-сосудистой системы (ССС) является степень тренированности. Академик Н. М. Амосов подчеркивает, что сильный внешний раздражитель для

детренированной клетки вводит ее в патологический режим, т. е. в болезнь, а для тренированной клетки — это нормальная интенсивная работа. Известно, что "энергетический запас" нормального режима среднетренированной клетки по сравнению с детренированной клеткой является трехкратным, высокотренированной клетки — шестикратным (!), и патологический режим детренированной клетки является нормальным режимом работы высокотренированной клетки [1].

Существующий в функциональной диагностике метод оценки степени тренированности сердца (7) по формуле

$$T = \frac{P_2 - P_1}{P_1} 100 \%,$$

где P_1 — частота пульса в положении сидя, P_2 — частота пульса после 10 приседаний, мало информативен, так как не позволяет определить чрезмерную физическую нагрузку, приводящую к патологическому состоянию ССС.

Самым распространенным методом диагностики ССС является электрокардиография [2]. Анализ электрокардиосигнала (ЭКС) позволяет зафиксировать нарушения ритма, т. е. констатировать нарушения проводимости, однако не позволяет оценить возможные нарушения сердечного ритма при различных нагрузках. Данная статья призвана восполнить этот пробел и посвящена определению условий возникновения атриовентрикулярной (АВ) блокады II степени.

Постановка задачи

Суть нарушения проводимости сердца сводится к полной или частичной блокаде проводящих путей. Частота сердечных сокращений (ЧСС), при которой возможна АВ-блокада II степени, определяется по формуле

$$ЧСС_{\text{бл}} = 60\,000/t_{\text{сбл}},$$

где $ЧСС_{\text{бл}}$ — частота сердечных сокращений, при которой возможно выпадение сокращений желудочков, т. е. возможно возникновение АВ-блокады II степени; $t_{\text{сбл}}$ — интервал времени в миллисекун-

дах между импульсами возбуждения синусового узла, при котором возможна АВ-блокада II степени. Интервал времени $t_{\text{сбл}}$ является условием возникновения АВ-блокады II степени, если число ответных импульсов H в клетках пучка Гиса (ПГ) меньше числа импульсов возбуждения L в синусовом узле (СУ), т. е. $H/L < 1$. На рис. 1 представлена схема нарушения ритма сердца, как следствие, — выпадения второго сокращения желудочков из-за короткого периода стимуляции t_s и удлиненного абсолютного рефрактерного периода R участка атриовентрикулярного узла (АВУ).

Из рис. 1 видно, что число ответных импульсов в клетках пучка Гиса $H = 2$ меньше числа импульсов возбуждения в синусовом узле $L = 3$.

Генезис АВ-блокады II степени обусловлен тем, что при постоянстве абсолютного и относительного рефрактерного периодов в АВ-соединении с увеличением нагрузки интервал PR (интервал между зубцами P и R на ЭКГ) есть убывающая функция предшествующего интервала PR . Рефрактерность — это состояние клетки, в котором она не возбудима и не может возбудить клетку, находящуюся в по-

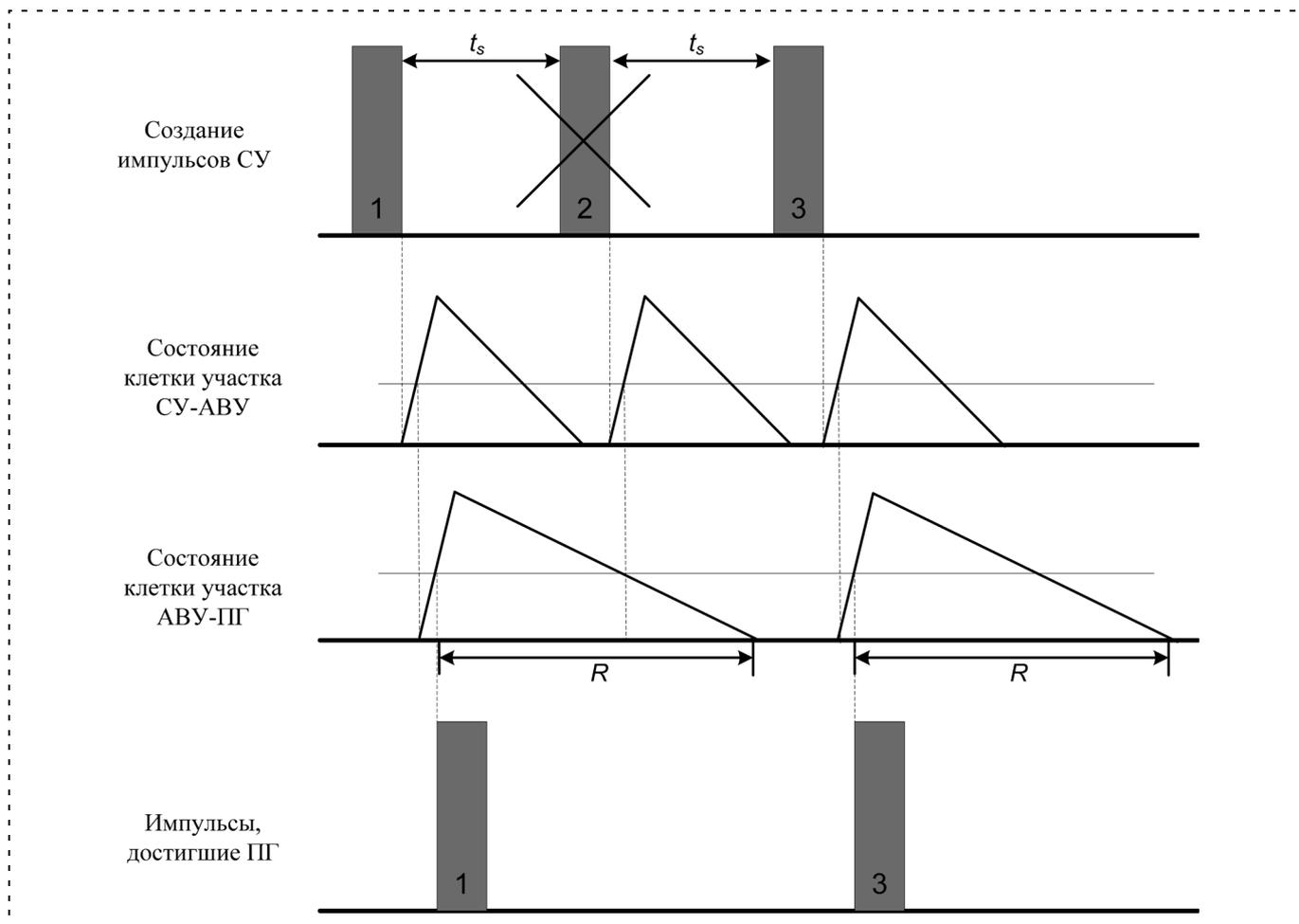


Рис. 1. Схема прохождения импульсами участка от синусового узла до пучка Гиса при АВ-блокаде II степени

кое [3]. При АВ-блокаде II степени проводимость в АВ-соединении прогрессивно ухудшается от сокращения к сокращению. Такое ухудшение АВ-проводимости продолжается до тех пор, пока АВ-соединение становится не в состоянии провести очередной импульс к желудочкам. Это приводит к выпадению сокращения желудочков (рис. 1).

Моделирование условий возникновения АВ-блокады II степени

В основе оценки степени тренированности сердца лежит прогнозирование сердечного ритма, заключающееся в экстраполяции результатов анализа информационных параметров ЭКС, моделировании распространения возбуждения в миокарде, построении функции кривой восстановления сердца пациента и определении ЧСС, при которой возможно выпадение сокращений желудочков. При увеличении физической нагрузки частота активации синусового узла увеличивается, а поскольку скорость распространения импульсов возбуждения остается неизменной, то возникают предпосылки АВ-блокады II степени.

Моделирование распространения возбуждения в миокарде осуществляется на основе τ -модели Винера—Розенблюта, позволяющей описать процесс

распространения возбуждения в проводящей системе сердца [4].

Модель Винера—Розенблюта описывается уравнением работы клеточного автомата [4]:

$$B(x_i, y_j, t) = \alpha(t) \sum_{i-j=1} B(x_j, y_j, t);$$

$$\alpha(t) = 1 - \frac{R - t_{\Pi}}{R},$$
(1)

где x, y — координаты клетки на плоскости; t — время; i — номер клетки, для которой определяется состояние; j — номер соседних клеток относительно i -й клетки; $\alpha(t)$ — значение рефрактерности клетки миокарда; R — длительность интервала рефрактерности; t_{Π} — длительность интервала покоя.

В качестве примера для определения условий возникновения АВ-блокады II взяты ЭКС пациента до и после нагрузки (рис. 2).

На основе анализа этих ЭКС в результате моделирования процесса распространения возбуждения в миокарде при различной частоте синусового узла определяются два массива (табл. 1): первый — массив интервалов времени от начала поступления импульса с синусового узла до начала ответного импульса в пучке Гиса (SH); второй — массив интервалов времени от начала активности в пучке Гиса

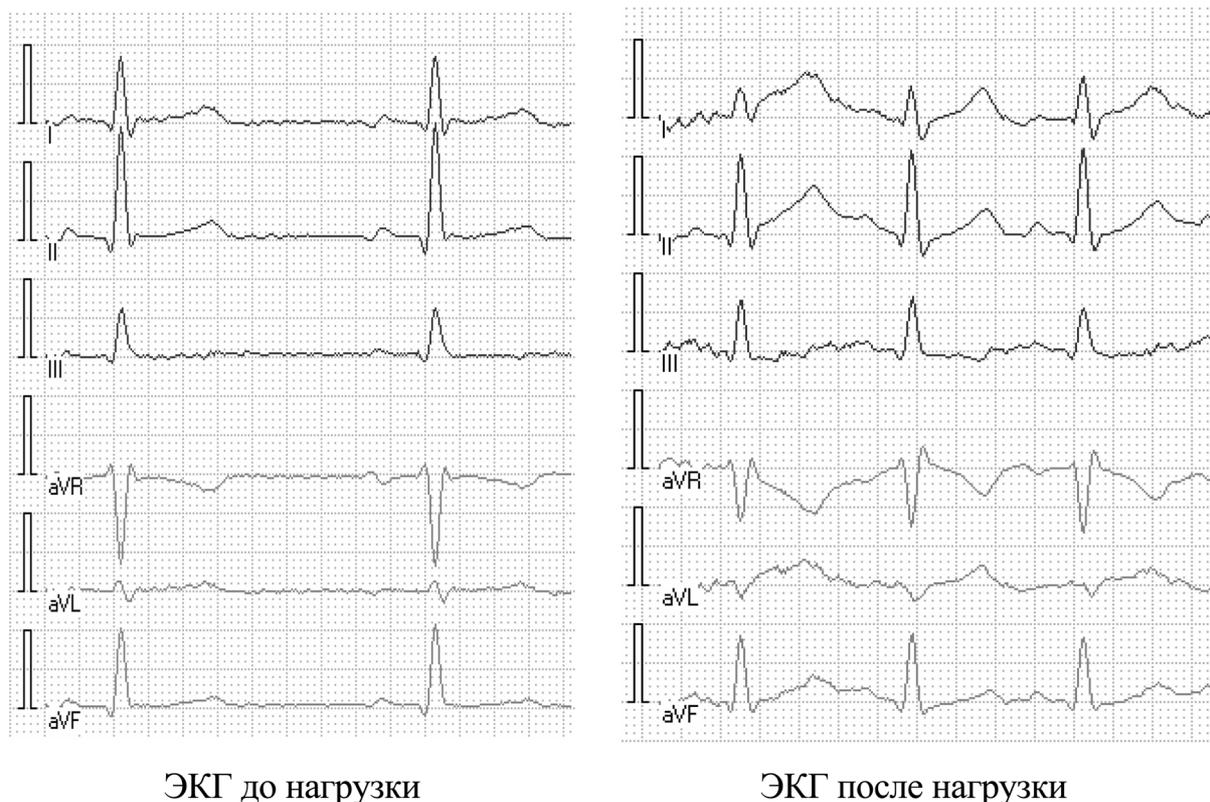


Рис. 2. ЭКГ пациента

Таблица 1

Интервал времени от начала активности в пучке Гиса до момента поступления следующего импульса с синусового узла, (HS), мс	Интервал времени от импульса с синусового узла до начала ответного импульса в пучке Гиса, (SH), мс
486,52	88,75
475,29	89,625
444,59	87,857
410,15	89,643
388,44	89,107
377,2	91,143
351	88,304
345,76	89,732
311,31	90,161
295,59	88,661
260,4	89,821
246,17	89,804
225,21	88,571
209,48	90,875
194,51	91,768
175,04	90,982
160,82	92,571
151,08	94,089
144,34	91,25
132,36	93,821
124,13	93,75
119,63	97,125
117,39	100,25
112,15	95,268
100,17	103,91
99,418	99,54
96,423	97,857
85,94	101,79
82,945	107,3
76,955	106,16
73,96	110,7
71,714	103,93
64,226	117,13

до момента поступления следующего импульса возбуждения с синусового узла (HS).

С помощью регрессионного анализа подбирается функция, которая наилучшим образом описывала бы изменение интервалов времени SH и HS. В электрофизиологии сердца такая функция называется кривой восстановления. В данном случае выбрана регрессионная модель, представленная экспоненциальной функцией вида

$$SH = SH_{\min} + \alpha e^{-HS/\beta}, \quad (2)$$

где SH_{\min} , α , β — положительные константы.

В уравнении (2) интервал HS можно выразить через предшествующий интервал SH. Тогда кривая восстановления может быть представлена в следующем виде:

$$SH_i = SH_{\min} + \alpha e^{-(Nt_s - SH_{i-1})/\beta}, \quad (3)$$

где N — наименьшее целое число импульсов, такое что $Nt_s - SH_{i-1} > R$; i — номер интервала.

Для определения параметров регрессионной модели используется метод наименьших квадратов. Для результатов моделирования, приведенных в табл. 1, регрессионная модель имеет вид

$$SH = 89 + 114e^{-HS/41}. \quad (4)$$

Графическая иллюстрация кривой восстановления приведена на рис. 3.

Полученная в виде уравнения модель (4) проверяется на адекватность средствами регрессионного и корреляционного анализа [5].

Теснота связи между величинами оценивается корреляционным отношением

$$R = \sqrt{\left(\frac{1 - \sigma_{\text{ост}}^2}{\sigma_y^2} \right)},$$

где σ_y^2 — общая дисперсия результативного признака; $\sigma_{\text{ост}}^2$ — остаточная дисперсия, определяемая исходя из уравнения регрессии.

$$\text{Так как } \sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum (y - \bar{y})^2, \text{ а } \sigma_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{n} \sum (y - \hat{y}_x)^2,$$

где \bar{y} — среднее значение результативного признака, \hat{y}_x — теоретическое значение результативного признака, то индекс корреляции можно выразить как

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2}{\sum (y - \bar{y})^2}}.$$

Значение данного показателя находится в границах $0 \leq R \leq 1$, и чем ближе к единице, тем теснее связь рассматриваемых признаков, тем более надежно найденное уравнение регрессии.

Коэффициент детерминации R^2 — величина, показывающая, какая часть общей вариации SH_i обусловлена вариацией SH_{i-1} .

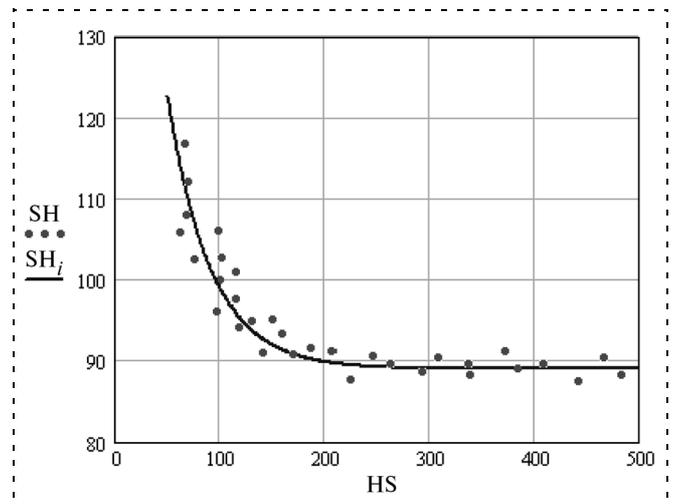


Рис. 3. Функция кривой восстановления

Качество построенной функции оценивается с использованием ошибки аппроксимации, которая рассчитывается по формуле

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum \frac{|y - \hat{y}_x|}{y} \cdot 100 \%,$$

где n — число интервалов SH.

Критерий Фишера F оценивает качество уравнения регрессии. Гипотеза состоит в том, что уравнение регрессии и показатели тесноты связи статистически незначимы. Значение критерия Фишера F определяется по формуле

$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2(n-m-1)}{(1-R^2)m},$$

где m — число параметров при переменной.

В процессе оценки адекватности модели (4) для интервалов SH из табл. 1 получены значения вышеуказанных критериев, которые приведены в табл. 2.

Анализ полученных критериев оценки адекватности модели (4) показывает, что

- зависимость изменения интервала SH от его предшествующего значения сильная;
- полученная в виде уравнения модель (4) адекватна и 95,5 % вариации интервала SH объясняются вариацией его предшествующего значения;
- ошибка аппроксимации $\bar{\varepsilon}$ составляет 3,5 % и не превышает 8...10 %, что свидетельствует о хорошем качестве модели (4);
- табличное (критическое) значение критерия Фишера F при уровне значимости 0,05 составляет 4,28. Поскольку, наоборот, $F_{\text{табл}} \ll F_{\text{факт}}$, то сделанная гипотеза отвергается и делается вывод о статистической значимости и надежности уравнения модели (4).

Итерирование полученного уравнения (4) для различных значений ЧСС позволит определить H и L для выявления условий возникновения АВ-блокады II степени.

В результате итераций для различных t_s определяются значения SH по формуле (4), а для каждого SH определяется число импульсов, созданных синусовым узлом по формуле

$$N_{i-1} = (R + SH_{i-1})/t_s + 1, \quad (5)$$

Таблица 2

Коэффициент	Значение
Индекс корреляции R	0,977323
Индекс детерминации R^2	0,955161
Ошибка аппроксимации $\bar{\varepsilon}$	3,52 %
Критерий Фишера F	468,6399

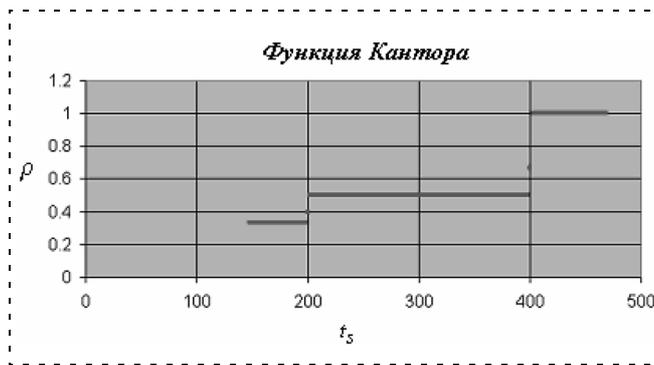


Рис. 4. График динамики поведения ССС в зависимости от периода возбуждения предсердий t_s

где R — длительность интервала рефрактерности.

При этом H и L находятся как $H = 1$, $L = N_i = (R + SH_{i-1})/t_s + 1$ при $N_1 = N_2 = \dots = N_i$; $H = i$, $L = N_1 + N_2 + \dots + N_i$ при $N_1 \neq N_2 \neq \dots \neq N_i$, где N_i — число импульсов, соответствующее интервалу SH_{*i*}.

Проведение итераций удобно представить графически. На рис. 4 показано отношение между числом проводимых биений и числом стимулов $\rho = H/L$ как функция t_s (функция Кантора).

Анализ графика показывает, что при $t_s = 400$ мс возникает ритм Венкебаха 2:1 ($\rho = 0,5$), т. е. при частоте пульса 150 ударов в минуту у пациента возможно выпадение сокращения желудочков. На графике функции Кантора наблюдаются классические ритмы Венкебаха вида $N:N-1$, а также более сложные их вариации.

Заключение

Таким образом, использование модели распространения возбуждения по проводящей системе сердца для построения графика функции Кантора позволяет:

- определить динамику поведения ССС для любого значения периода возбуждения предсердий t_s ;
- спрогнозировать возникновение ритмов Венкебаха (атриовентрикулярной блокады II степени) и связанных с ними аритмий;
- оценить степень тренированности ССС.

Список литературы

1. Амосов Н. М. Раздумья о здоровье. М.: Молодая гвардия, 1979. 191 с.
2. Орлов В. Н. Руководство по электрокардиографии. М.: Медицина, 1984, 528 с.
3. Антонов В. Ф. Биофизика мембран // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 6. 4—12 с.
4. Винер Н., Розенблют А. Проведение импульсов в сердечной мышце // Кибернетический сборник. 1961. № 3.
5. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. Анализ данных на компьютере / Под ред. В. Э. Фигурнова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ИНФРА-М, 2003. 544 с.

М. А. Сидорова, канд. техн. наук, доц.,
Н. А. Ерушова, ассистент,
 Пензенская государственная
 технологическая академия
 sidorova_mailbox@mail.ru

Обоснование выбора параметров нейросетевой скрининговой диагностики нарушений системы гемостаза

Рассмотрены вопросы разработки системы скринингового исследования параметров гемостаза. Анализируются возможности повышения качества диагностики тромбозов и эмболии, а также предотвращения развития серьезных осложнений подобных нарушений и риска внезапной смерти пациентов с помощью нейросетевой скрининговой диагностики. Представлены теоретические исследования, направленные на выявление наиболее информативных параметров в целях уменьшения среднего значения квадратов ошибок (пропусков и ложных срабатываний нейронной сети), а также сокращения объемов вычислений.

Ключевые слова: гемостаз, параметры, нейронная сеть, норма, патология, коэффициент корреляции, анализ значимости, вероятность правильной классификации.

Введение

В настоящее время одной из важнейших проблем медицины является высокая смертность населения России из-за сердечно-сосудистых заболеваний. При этом, если в Европе имеется тенденция к снижению данного показателя, то в нашей стране число людей, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями, каждый год увеличивается на 1...2 % [1]. Кроме того, данный класс заболеваний практически всегда сопровождается тромбозами, увеличивающими риск внезапной смерти.

Согласно современным представлениям, внутрисосудистое тромбообразование является сложным процессом, обусловленным воздействием многих факторов. Среди причин, способствующих развитию внутрисосудистого тромбоза, большое значение придается изменению сосудистой стенки, нарушению гемодинамики, склонности к спазмам артерий, изменению в системе гемостаза (нарушения свертывания крови). Очевидно, что исследование параметров гемостаза и их влияния на процессы тромбообразования представляет большой практический интерес [2].

Под системой гемостаза понимают совокупность компонентов кровеносных сосудов, крови и их взаимодействий, которая обеспечивает поддержа-

ние целостности кровеносных сосудов, жидкое состояние крови внутри сосудов и остановку кровотечения при повреждении сосуда [3].

Современная медицина оперирует множеством различных биохимических показателей, характеризующих коагуляционный гемостаз. Ниже перечислены основные параметры гемостаза (вместе с общепринятыми сокращениями), наиболее часто используемые при диагностике нарушений свертывания крови в силу своей информативности и невысокой стоимости реагентов для лабораторной диагностики:

- 1) Вс — время свертывания (мин);
- 2) Эх — эхитоксовое время (с);
- 3) Ат3 — антитромбин III (мг/л);
- 4) АПТВ — активированное парциальное (частичное) тромбопластиновое время (с);
- 5) АПТВк — активированное парциальное (частичное) тромбопластиновое время (с) в контрольном образце;
- 6) Тв — тромбиновое время (с);
- 7) Оф — ортофенантролин (мг/дл);
- 8) Кл — клампинг-тест (тест склеивания стафилококков) (г/л);
- 9) ААТ2 — показатель агрегационной активности одного тромбоцита при индукции агрегации разведением гемолизата 10^{-2} (с);
- 10) ААТ6 — показатель агрегационной активности одного тромбоцита при индукции агрегации разведением гемолизата 10^{-6} (с);
- 11) ИАТ — индекс активации тромбоцитов (ААТ6/ААТ2);
- 12) Хзф — хагеман-зависимый фибринолиз (мин);
- 13) Иэф — индуцированный стрептокиназой эуглобулиновый фибринолиз (с);
- 14) Пти — протромбиновый индекс (%);
- 15) Фг — фибриноген (г/л);
- 16) Тромб — число тромбоцитов (тыс./мкл).

При анализе параметров возникает ряд трудностей, связанных с невозможностью разграничить диапазоны нормальных и патологических значений параметров. Проведенные авторами исследования показали, что для назначения комплекса диагностических мероприятий целесообразно проводить скрининговое исследование, позволяющее получить предварительный диагноз и с заданной точностью определить вероятность возникновения той или иной патологии системы гемостаза.

Постановка диагноза, в общем случае сводящаяся к классификации состояния пациента как нормального или патологического, очень плохо алгоритмируется. Поэтому в качестве основы для построения скрининговой системы были выбраны нейронные сети, так как они способны обучаться,

а также обобщать накопленную информацию и вырабатывать ожидаемую реакцию применительно к данным, не обработанным в процессе обучения.

Особенности создания нейронной сети для скрининговой системы диагностики нарушений гемостаза

Нейронная сеть строится в два этапа:

1. Выбор типа (архитектуры) сети.
2. Подбор весов (обучение) сети.

На первом этапе необходимо определить, какие нейроны использовать (число входов, функции активации), каким образом следует соединить нейроны между собой, что взять в качестве входов и выходов сети.

Существуют несколько десятков различных нейросетевых архитектур, причем эффективность многих из них доказана математически [4].

В рассматриваемой скрининговой системе были использованы однонаправленные многослойные (двухслойные) нейронные сети (рис. 1). Число входов определяется числом исследуемых параметров гемостаза — их 16. Функция активации (нелинейная усилительная характеристика нейрона) выбрана логистической сигмоидальной *logsig* для каждого из двух слоев. Выходов у нейронной сети два — первый выход несет информацию о нормальных значениях параметров гемостаза, второй выход отвечает за формирование единичного сигнала в случае, когда параметры гемостаза соответствуют области патологии.

Процесс функционирования нейронной сети, сущность действий, которые она способна выполнять, зависит от значений синаптических связей (весов). Поэтому, задавая определенную структуру сети, необходимо найти оптимальные значения всех переменных весовых коэффициентов. Этот этап называется обучением нейронной сети.

Предварительные исследования показали, что комплекс нейронных сетей, обученный на модельных данных, взятых из специализированных источников, эффективно выполняет задачи разделения параметров гемостаза на нормальные и патологические. В этом случае система анализирует "иде-

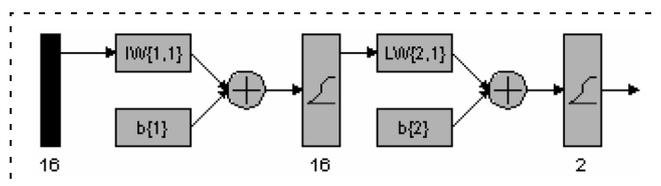


Рис. 1

Данные для обучающего множества						Данные для матрицы желаемых результатов	
Тв	ИАТ	Иэф	Пти	Фг	Тромб	Патология	Норма
16	0		86	3,17	176	1	0
14	1,14	77	88	3,77	188	0	1
15	1,3	70	100	2,44		0	1
15	1,16	85	90	2,66	316	0	1
15	1,1	69	94	1,89	230	0	1
14	0,94	76	104	3,99	226	0	1
16		110	90	3,1	60	1	0
15	1,7	85	120	0,88	211	0	1
14	0,69	80	100	3,77	231	0	1
25	2,14		95	5,93	214	1	0

альные" значения параметров биохимии крови: при констатации нормального состояния пациента ни один из исследуемых параметров не выходит за границы диапазона нормы. При наличии той или иной патологии системы гемостаза все исследуемые параметры в большей или меньшей степени смещены в область патологических значений. Дальнейшие исследования были связаны с тестированием нейронных сетей на экспериментальных данных из клинической практики, т. е. на реальных данных (не верифицированных, не систематизированных).

На первом этапе было сформировано обучающее множество — матрица, содержащая как нормальные, так и патологические комбинации значений 16 параметров свертывания, приведенных выше. Число столбцов матрицы равно числу исследуемых параметров свертывания, число строк ограничивается лишь объемом имеющихся у исследователя данных о значениях параметров свертывания при различных патологиях системы гемостаза, а также о значениях этих параметров у здоровых людей. Одновременно была сформирована матрица желаемых результатов, состоящая из нулей и единиц. Число строк в матрице желаемых результатов (МЖР) соответствует числу строк обучающего множества (ОМ), число столбцов равно двум. Значения в столбцах всегда парные: 0 и 1, если строка ОМ содержит нормальные значения параметров гемостаза; 1 и 0, если строка ОМ содержит патологические значения. В качестве примера в табл. 1 приведен фрагмент данных для ОМ и МЖР.

На втором этапе происходит обучение нейронных сетей, созданных с использованием стандартных средств пакета MatLab, т. е. настройка весов и

Таблица 2

Результат работы НС		Контрольная МЖР	
Патология	Норма	Патология	Норма
3,79E-06	0,99997	0	1
1,99E-05	0,99999	0	1
1,99E-05	0,99999	0	1
1,99E-05	0,99999	0	1
0,99998	1,73E-05	1	0
1,99E-05	0,99999	0	1
1,99E-05	0,99999	0	1
1,99E-05	0,99999	0	1
0,79459	0,027613	1	0

смещений нейронной сети таким образом, чтобы при предъявлении входного множества на выходе формировалась МЖР.

В процессе функционирования нейронная сеть формирует выходной сигнал Y в соответствии с входным сигналом X , реализуя некоторую функцию $g: Y = g(X)$. При заданной архитектуре вид функции g определяется значениями синаптических весов и смещений. Пусть решение поставленной задачи есть функция r (целевая функция), E — функция ошибки (функционал качества), показывающая для каждой из функций g степень близости к r . Обучение состоит в поиске (синтезе) функции g , оптимальной по E , и представляет собой итерационную процедуру. На каждой итерации происходит уменьшение функции ошибки [4]. При таком подходе можно использовать градиентные алгоритмы, основу которых составляет выявление градиента целевой функции. В ходе тестирования [5] алгоритмов обучения наиболее эффективным был признан алгоритм Левенберга—Марквардта (наименьшее время обучения, наименьшее число циклов обучения, наименьшая вычислительная сложность).

После обучения сети контролируют ее работу, т. е. оценивают эффективность работы нейронной сети в задаче обнаружения (классификации). С этой целью используются контрольные множества, содержащие наборы как нормальных, так и патологических параметров гемостаза, а также МЖР для контрольных множеств. Сравнивая результат работы нейронной сети с контрольным МЖР (табл. 2) на основании различных критериев оценивают эффективность работы нейронной сети.

По результатам многочисленных тестов [5] сделан общий вывод, что алгоритм Левенберга—Марквардта по эффективности доминирует над остальными алгоритмами, однако это очевидное превосходство исчезает при значительном увеличении размеров сети. Таким образом, для повышения качества работы нейронной сети, обученной по алгоритму Левенберга—Марквардта, необходимо сократить число нейросетевых входов, тем самым уменьшая число межнейронных связей.

Автоматически оценка работы нейронной сети проводится с помощью функции mse , вычисляющей среднее значение квадратов ошибок (пропусков и ложных срабатываний нейронной сети). Значение данной функции для нейронной сети, тестируемой с использованием контрольного множества, состоящего из 26 значений 16 параметров, составило $sqr = 0,1314$. В целях уменьшения данного показателя, а также сокращения объемов вычислений, необходимо выявить наиболее информативные параметры и использовать их для дальнейших исследований.

Анализ коэффициента корреляции

При сокращении числа параметров в первую очередь рассчитали коэффициент корреляции для определения наличия взаимосвязи между параметрами. Фрагменты результатов расчета представлены в табл. 3 (для "нормы") и в табл. 4 (для "патологии"). В табл. 3, 4 полужирным курсивом выделены зна-

Таблица 3

	Вс	Эх	Ат3	АПТВ	АПТВк	Тв	Оф	Кл
Вс	1							
Эх	0,317236	1						
Ат3	-0,05684	0,21923	1					
АПТВ	0,296851	0,03861	-0,19757	1				
АПТВк	0,315174	0,027301	-0,33619	0,826764	1			
Тв	0,203632	0,50546	0,089446	0,245555	0,0834	1		
Оф	0,302106	0,056478	-0,39597	0,137613	0,253252	0,128467	1	
Кл	0,366986	0,245732	-0,22465	0,047478	0,092243	0,318924	0,744647	1

Таблица 4

	Вс	Эх	АтЗ	АПТВ	АПТВк	Тв	Оф	Кл
Вс	1							
Эх	0,154353	1						
АтЗ	-0,63947	-0,38315	1					
АПТВ	0,641349	0,103166	-0,68999	1				
АПТВк	-0,37671	-0,15432	0,221686	0,107063	1			
Тв	0,600124	0,653597	-0,38142	0,161963	-0,2454	1		
Оф	0,389578	0,381361	-0,23179	0,374573	-0,03553	0,313498	1	
Кл	0,537064	-0,62584	0,227833	0,128081	-0,52271	0,184672	0,97606	1

Таблица 5

МЖР								
0	0	0	0	1	0	0	0	0
общая								
3,79E-06	1,99E-05	1,99E-05	1,99E-05	0,999982	0,99E-05	1,99E-05	1,99E-05	1,99E-05
Вс								
-0,5181	-2,49E-09	-2,35E-09	-2,48E-09	0	-2,32E-09	-2,49E-09	-2,49E-09	-2,49E-09
Эх								
-0,00026	-0,00171	-0,00172	-0,00171	0,012475	-0,0008	-0,00171	-0,00164	-0,00164
АтЗ								
-3,10E-12	-5,71E-13	-5,71E-13	-5,71E-13	2,22E-16	-5,72E-13	-5,71E-13	-5,71E-13	-5,71E-13
АПТВ								
-7,81E-11	-4,94E-17	-3,01E-17	-1,63E-17	0,99856	-3,14E-15	-2,59E-15	-5,52E-17	-5,52E-17
АПТВк								
-3,77E-09	-1,03E-09	-4,75E-27	-1,03E-09	0	-6,99E-11	-4,64E-27	-9,91E-10	-9,91E-10
Тв								
-6,60E-07	-1,34E-32	-5,37E-18	-1,61E-32	1,57E-11	-1,65E-11	-1,34E-32	-1,34E-32	-1,34E-32
Оф								
-3,18E-14	-3,18E-14	-3,18E-14	-3,18E-14	0	-3,18E-14	-3,18E-14	-3,18E-14	-3,18E-14
Кл								
-1,29E-11	-3,85E-24	-3,83E-24	-3,83E-24	0	-8,11E-20	-3,83E-24	-3,83E-24	-3,83E-24
ААТ2								
-0,02689	-0,02326	-0,01696	-0,01348	0,002608	-0,0148	-0,01688	-0,01502	-0,01502
ААТ6								
-7,78E-12	-2,85E-34	-1,75E-13	-3,05E-12	1	-3,84E-23	-7,29E-34	-2,85E-34	-2,85E-34
ИАТ								
-1,07E-21	-1,07E-21	-1,07E-21	-1,07E-21	1,52E-12	-2,23E-12	-1,07E-21	-1,24E-21	-1,24E-21
Хзф								
-0,99819	-3,15E-22	-2,09E-15	-1,05E-17	0	-1,93E-14	-2,51E-17	-1,34E-20	-1,34E-20
Иэф								
-0,99787	-2,27E-15	-1,12E-15	-2,31E-15	2,44E-14	-4,26E-18	-2,23E-15	-2,27E-15	-2,27E-15
Пти								
-1,44E-06	-8,95E-12	-3,85E-18	-4,24E-12	0,96915	-1,88E-17	-3,85E-18	-3,85E-18	-3,85E-18
Фг								
-3,03E-25	-1,77E-20	-8,58E-18	-1,77E-20	1	-7,66E-12	-8,79E-17	-1,77E-20	-1,77E-20
Тромб								
-3,90E-46	-3,30E-12	-3,30E-12	-3,30E-12	9,77E-15	-3,30E-12	-3,30E-12	-3,30E-12	-3,30E-12

чения коэффициента, свидетельствующие о наличии средней корреляции, серой заливкой — о корреляции выше среднего, полужирным шрифтом — о наличии сильной корреляции.

Анализ коэффициентов корреляции показал, что большинство параметров у здоровых пациентов слабо коррелированы, а исключение параметров на основе исследований выборки патологических значений нецелесообразно, так как может привести к ошибкам распознавания сетью нормальных значений. В связи с этим потребовалось оценить "вклад" каждого параметра в работу нейронной сети. Матрица весовых коэффициентов для такой оценки не подходит, так как определить степень влияния остальных параметров на исследуемый, не представляется возможным.

Анализ значимости параметров

Для оценки влияния каждого из рассматриваемых параметров на результат работы нейронной сети последовательно исключали параметры из обучающего множества. Это означает, что рассматривалась та же матрица желаемых результатов, что и для нейронной сети, обученной на 16 параметрах, а из обучающего множества удалялась строка с параметром, влияние которого оценивается. Таким образом получили 16 нейронных сетей с пятнадцатью входами и двумя выходами каждая. Архитектура нейронных сетей при этом не изменялась. Следует отметить, что исключение каждого из исследуемых параметров вносило неопределенность в работу нейронной сети, т. е. четких парных значений 0—1 и 1—0 на выходах не получалось. В качестве примера на рис. 2 приведен фрагмент результатов работы нейронной сети при исключении одного из параметров (АПТВ).

Отметив, что выход "Патология" дает результат, близкий к истине, а неопределенность вносит выход "Норма", для дальнейшего анализа использовали только первый выход.

В качестве примера в табл. 5 приведен фрагмент результатов работы нейронной сети при исключении каждого из рассматриваемых параметров (серым выделены неверные срабатывания нейронной сети).

Для оценки значимости каждого из рассматриваемых параметров рассчитали вероятности правильной классификации состояния пациента при исключении того или иного параметра как отношение числа верных срабатываний нейронной сети к объему выборки (табл. 6).

В табл. 6 цветом выделены параметры, исключение которых приводит к увеличению вероятности

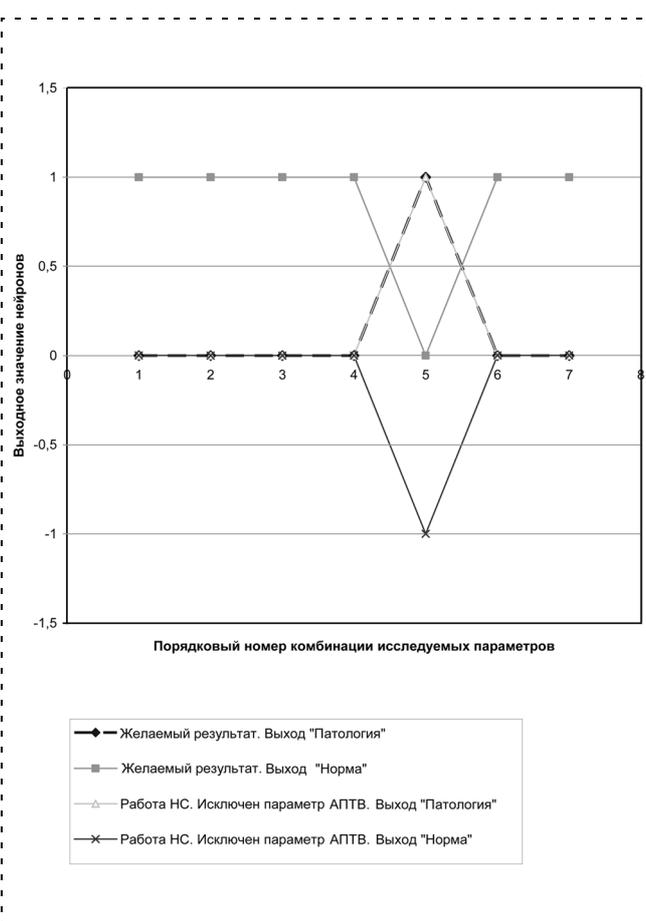


Рис. 2

Таблица 6

Исключаемый параметр	Вероятность правильной классификации состояния пациента при исключении параметра
Нет	0,85
Вс	0,85
Эх	0,85
Ат3	0,88
АПТВ	0,92
АПТВк	0,81
Тв	0,73
Оф	0,77
Кл	0,85
ААТ2	0,88
ААТ6	0,88
ИАТ	0,88
Хзф	0,73
Иэф	0,73
Пти	0,85
Фг	0,88
Тромб	0,85

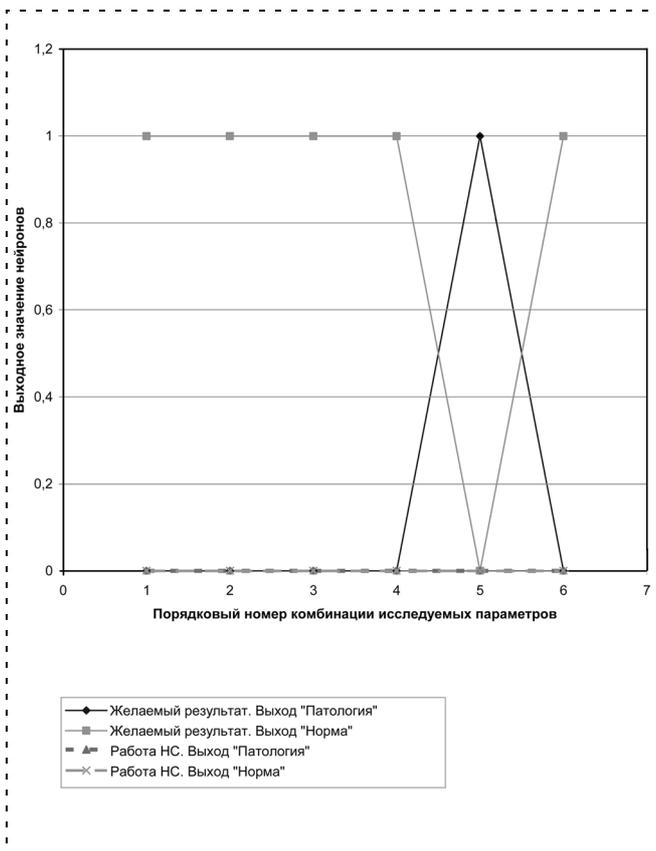


Рис. 3

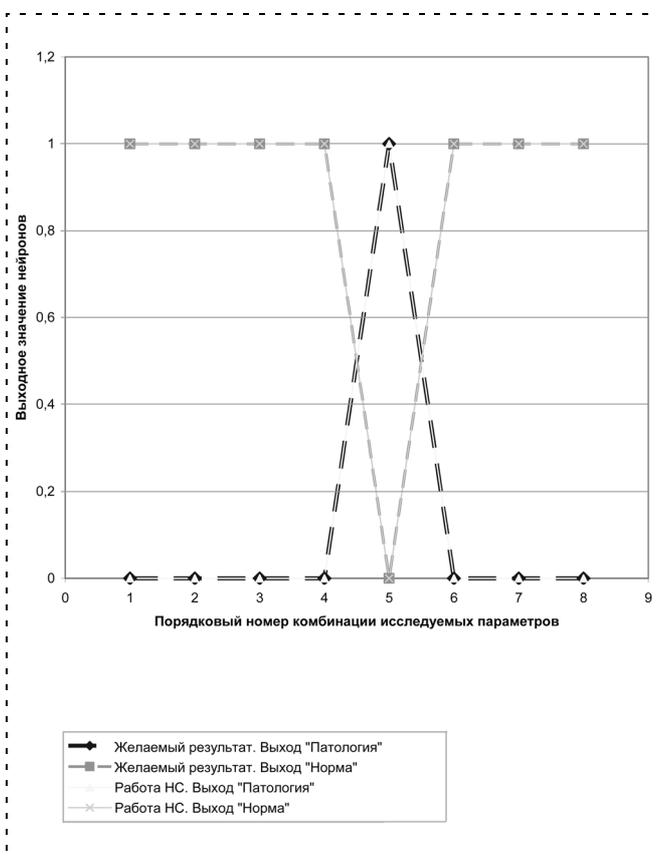


Рис. 4

правильной классификации состояния пациента. На основании этого построили нейронную сеть, обученную на тех же данных, но по 10 параметрам (из исходного обучающего множества исключили столбцы, в которых содержится информация о параметрах АтЗ, АПТВ, ААТ2, ААТ6, ИАТ, Фг). В качестве примера на рис. 3 представлен фрагмент результатов работы нейронной сети (анализируемые параметры: Вс, Эх, АПТВк, ТВ, Оф, Кл, Хзф, Иэф, Тпи, Тромб).

Таким образом, для исключения параметров недостаточно просто оценить вероятность правильной классификации.

Для дальнейшего анализа были рассчитаны функции mse, вычисляющие средние значения квадратов ошибок (пропусков и ложных срабатываний нейронной сети) для каждой из пятнадцати нейронных сетей, и сравнивали значения этих функций. Было выяснено, что исключенный ранее параметр ААТ6 вносит меньшую ошибку по сравнению с параметром Пти (0,1924 и 0,1901 соответственно). На основании проведенных исследований в качестве входных параметров выделили следующие: Вс, Эх, АПТВк, Тв, Оф, Кл, ААТ6, Хзф, Иэф, тромб. Построили нейронную сеть, обученную на этих данных, и проконтролировали ее работу. В качестве примера на рис. 4 представлен фрагмент результатов работы нейронной сети.

Для данной нейронной сети были рассчитаны вероятность правильной классификации состояния пациента, которая составила 0,92, и функция mse, вычисляющая среднее значение квадратов ошибок (пропусков и ложных срабатываний нейронной сети) $sqr = 0,0769$. Таким образом, сокращение анализируемых параметров привело к повышению качества классификации состояния пациента нейронной сетью.

Заключение

Таким образом, совокупность нейронных сетей позволяет проводить поэтапную систематизацию параметров биохимии крови, в результате которой на первом этапе выявляется отклонение тех или иных параметров от нормы, а на втором выделяются две области "патологии". В конечном итоге ставится предварительный диагноз о наличии или отсутствии патологических состояний системы гемостаза. При этом для использования нейронных сетей не требуется наличия специальных аппаратных средств в учреждениях здравоохранения. Обработка параметров биохимии крови проводится на обычном ПК.

В настоящее время авторами ведутся работы по созданию "дружественного" интерфейса, позволяющего использовать нейронные сети даже неподготовленному пользователю, а также значительно упростить процедуры формирования матрицы параметров, используемых для работы сети, ее обучения, тестирования и контроля.

Ожидаемые результаты исследований являются важными для обеспечения своевременной и качественной диагностики нарушений в системе гемостаза на ранних стадиях развития заболеваний. Исследования являются основой создания скрининговой системы диагностики параметров гемостаза, предназначенной для предварительной диагностики, что, в конечном итоге, опосредовано определяет перспективы сохранения здоровья населения.

Практическое применение скрининговой системы позволит в дальнейшем сократить временные и материальные затраты пациентов на дорогостоящую диагностику тромбозов и эмболий.

Список литературы

1. **Розина Н.** Атеротромбоз — необходимо действовать — публикации // Фармацевтический вестник. 2006. № 14. С. 12.
2. **Панченко В. М.** Свертывающая, противосвертывающая системы в патогенезе и лечении внутрисосудистых тромбозов. М.: 1966.
3. <http://humbio.ru/>
4. **Круглов В. В., Борисов В. В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия — Телеком, 2002.
5. **Оссовский С.** Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И. Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002.

Поздравляем Юбилера!



Директору Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, заведующему базовыми кафедрами Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета и Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, члену редколлегии журнала "Мехатроника, автоматизация, управление", члену-корреспонденту РАН, доктору технических наук, профессору

Рафаэлю Мидхатовичу ЮСУПОВУ

исполнилось 75 лет

Рафаэль Мидхатович Юсупов — выдающийся ученый в области информатики и теории управления, основатель и руководитель ведущих отечественных научных школ по теории чувствительности информационно-управляющих систем и научно-методическим основам информатизации общества.

Р. М. Юсупов внес огромный вклад в развитие таких ключевых направлений современной теории автоматического управления, как теория идентификации, теория чувствительности и теория адаптации автоматических систем. Значительные результаты получены им в области теории управления полетом летательных аппаратов. В последние десятилетия его научные интересы связаны с актуальными проблемами сбора и обработки информации, экологического мониторинга и управления геофизическими процессами, телекоммуникаций и телемедицины, а также с разработкой концептуальных и научно-методических основ информатизации и безопасности современного общества. Он является автором более 350 научных трудов, включая 20 монографий и 17 изобретений.

Свою высокоэффективную научную деятельность Р. М. Юсупов успешно сочетает с работой по подготовке высококвалифицированных инженерных и научных кадров. Им подготовлено 13 докторов и 45 кандидатов наук, среди которых известные руководители научных и производственных организаций.

Высокий профессионализм, широкая эрудиция, большая трудоспособность, чуткость и отзывчивость снискали ему большое уважение учеников и коллег.

Редакционный совет, редакционная коллегия и коллектив редакции журнала сердечно поздравляют Рафаэля Мидхатовича Юсупова с юбилеем и желают ему здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов на благо российской науки и техники.

ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ТЕРЯЕВ Е. Д.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ХИМЕНКО В. И.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЛЫСЕНКО А. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Девятисильный А. С., Числов К. А.

Модель гравиинерциальной системы на подвижном основании 67

Заведеев А. И.

Исследование точности астрономической системы управления ориентацией космического аппарата 70

Ивченко Н. К., Ивченко А. В.

Аналитический подход к проблеме монтажных искажений быстро-вращающейся опоры гироприбора 75

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
К. А. Числов, мл. науч. сотр.,
 Институт автоматизации и процессов управления
 ДВО РАН, г. Владивосток
 kirielche@rambler.ru

Модель гравинерциальной системы на подвижном основании

В рамках метода инерциальной навигации сформулирована и исследована задача оценки локальных значений напряженности гравитационного поля Земли, решаемая в режиме текущего времени на траектории движения объекта алгоритмом динамического оценивания калмановского типа.

Ключевые слова: метод интегральной навигации, гравиметрия, обратная задача.

Введение

Объективный характер гравиметрической разведки обуславливает ее важнейшую роль при решении задач изучения земной коры, поиска месторождений нефти, газа, угля и других полезных ископаемых. При этом возможность оперативного охвата гравиметрическими наблюдениями больших и/или труднодоступных географических районов (например, что вполне актуально, арктических) достигается благодаря реализации таких наблюдений на подвижных объектах. Полная задача гравиметрического районирования включает в себя как задачу оценивания локальных значений напряженности гравитационного поля Земли (GE -поля), так и задачу географической привязки получаемых оценок. Учитывая общность теоретико-механических представлений, лежащих в основе гравиметрии и инерциальной навигации, в работе [1] обе эти задачи решаются в рамках модели обратной задачи, являющейся, по сути, моделью двухкомпонентной (2D) инерциальной навигационной системы (ИНС), функционирующей в условиях неполной гравитационной определенности и корректируемой по позиционной информации, поступающей от навигационной спутниковой системы (НСС) типа ГЛОНАСС.

В данной статье проблема подвижной гравиметрии решается на базе трехкомпонентного (3D, в отличие от 2D в [1]) метода инерциальной навигации (ИНМ) [2] при сохранении (как и в [1]) условия доступности полной позиционной информации от НСС, а именно: рассматривается модель гравинерциальной системы (ГИС) как системы оценивания

вектора напряженности GE -поля, корректируемой только радиальной (модуль радиус-вектора места объекта) компонентой позиционной информации. Наличие второй компоненты позиционной информации (о географических координатах) по существу, и как здесь полагается, вполне исчерпывает проблему географической привязки.

Основные модели

С учетом изложенного выше при формализации модели обратной задачи, решаемой ГИС, можно обойтись динамической группой уравнений (ДГУ) ИНМ [2]

$$\begin{aligned} D\mathbf{q} &= \mathbf{p}; \mathbf{q}(0) = \mathbf{q}_0; \\ D\mathbf{p} &= \mathbf{G} + \mathbf{F}; \mathbf{p}(0) = \mathbf{p}_0 \end{aligned} \quad (1)$$

и моделью измерений значений $|\mathbf{q}|$ (радиальная информация). В (1) используются следующие обозначения: $\mathbf{q} = (q_i)$, $\mathbf{p} = (p_i)$, $\mathbf{G} = (G_i)$, $\mathbf{F} = (F_i)$ — соответственно векторы положения, удельных импульсов (абсолютной линейной скорости), напряженности GE -поля и удельных сил негравитационной природы, $i = \overline{1, 3}$; $\mathbf{D} = (D_{ij})$ — оператор абсолютного дифференцирования по времени (t), причем $D_{ij} = \delta_{ij} \frac{d}{dt} - e_{ikj} \omega_k$, $i, j, k = \overline{1, 3}$, где δ_{ij} и e_{ikj} — символы соответственно Кронекера и Леви-Чивита; $\omega = (\omega_i)$ — вектор абсолютной угловой скорости вращения приборного координатного правого ортогонального трехгранника (назовем его $\tilde{o}y = \tilde{o}y_1y_2y_3$), в осях которого с помощью инерциальных приборов (ньютонметров и гироскопов) измеряются компоненты векторов \mathbf{F} и ω ; в отношении осей трехгранника $\tilde{o}y$, физически реализуемого на борту объекта-носителя, примем, что они ориентированы по сторонам света, так что оси $\tilde{o}y_1$, $\tilde{o}y_2$ и $\tilde{o}y_3$ направлены соответственно на географические восток, север и по радиус-вектору \mathbf{q} ; заметим также, что решение обратной задачи, в которую погружается задача гравиметрии, выполняется в осях трехгранника $oy = oy_1y_2y_3$ с началом (o) в центре Земли и осями, коллинеарными соответствующим осям приборного трехгранника $\tilde{o}y$.

Далее, следуя апробированной методике [1], формулируется обратная задача в малом, формально

представляемая в виде "состояние—измерение", а именно:

$$\begin{aligned}
 D_{ij}\delta q_j &= \delta p_i - e_{ikj}v_k q_j; \delta q_i(0) = \delta q_{i,0}; \\
 D_{ij}\delta p_j &= \delta G_i + f_i - e_{ikj}v_k p_j; \delta p_i(0) = \delta p_{i,0}; \\
 \dot{g} &= -\lambda_t g + \sqrt{2\lambda_t}\sigma_t u_g; g(0) = g_0; \\
 \dot{f}_3 &= -\lambda_{f_3} f_3 + \sqrt{2\lambda_{f_3}}\sigma_{f_3} u_{f_3}; f_3(0) = f_{3,0}; \\
 \delta J &= \delta q_3 + \varepsilon; \\
 i, j, k &= \overline{1, 3},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где δ — символ первой вариации; $\delta \mathbf{G} = (\delta G_i) = -\omega_0^2 \delta \mathbf{q} + \mathbf{g} + 3\omega_0^2 \mathbf{q}_0 \varepsilon$; $\omega_0 = (\mu/|\mathbf{q}|^3)^{1/2}$ — частота Шулера; μ — гравитационный параметр Земли; $\mathbf{q}_0 = (0, 0, 1)^T$; $\tilde{\mathbf{g}} = (0, 0, g)^T$ — модель аномалии напряженности GE -поля; $\mathbf{v} = (v_i)$, $\mathbf{f} = (f_i)$, ε — инструментальные погрешности соответственно гироскопов, ньютометров и измерения значения $|\mathbf{q}|$, причем $v_i: N(0, \sigma_v^2)$, $i = \overline{1, 3}$; $f_i: N(0, \sigma_f^2)$, $i = \overline{1, 2}$; $\varepsilon: N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ ($N(A, B)$ — нормальный белый шум со средним A и интенсивностью B); $\mathbf{u} = (u_i)$ — порождающий процессы $g(t)$ и $f_3(t)$ белый шум, $u_i: N(0, 1)$, $i = g, f_3$; $(\lambda_{f_3}, \sigma_{f_3})$ и (λ_t, σ_t) — параметры сноса и диффузии случайных марковских процессов первого порядка $f_3(t)$ и $g(t)$; отличие процесса f_3 от процессов f_1 и f_2 обусловлено тем, что в ГИС в качестве третьего ньютометра применяется гравиметр; временной процесс $g(t)$ при движении объекта порождается простран-

ственным процессом $g(s)$ с параметрами (λ_s, σ_s) , так что $\lambda_t = \lambda_s v$, $\sigma_t = \sigma_s$; v — относительная (к поверхности Земли) скорость объекта.

Из (2) с очевидностью следует, что разрешимость поставленной обратной задачи находится в прямой зависимости от соотношения между параметрами сноса λ_t и λ_f ; действительно, при $\lambda_t = \lambda_f$ задача неразрешима. Для практической гравиметрии это означает, что при движении объекта со скоростью v не может наблюдаться процесс $g(s)$ со значением параметра $\lambda_s = \lambda_f/v$ и для наблюдения такого процесса необходима реализация других значений λ_f и/или v .

Вычислительные эксперименты

Достаточно полное исследование модели было выполнено в ходе вычислительных экспериментов. В частности, в рамках МНК-представлений были вычислены и сравнены сингулярные числа обусловленности ($\tilde{\mu}$) конечномерных операторов модели (2) 3D-ИНМ в ее базовом варианте с вектором состояния $\mathbf{x} = (\delta q_1, \delta p_1, \delta q_2, \delta p_2, \delta q_3, \delta p_3)^T$ и аналогичной модели 2D-ИНМ [1] в базовом варианте с $\mathbf{x} = (\delta q_1, \delta p_1, \delta q_2, \delta p_2)^T$. В физических переменных эти числа оцениваются соответственно значениями $\tilde{\mu}_3 \sim 3 \cdot 10^7$ и $\tilde{\mu}_2 \sim 5 \cdot 10^5$, а в нормированных (при по столбцовой нормировке операторов) — значениями $\tilde{\mu}_3 \sim 2 \cdot 10^3$ и $\tilde{\mu}_2 \sim 2$. Из этих предварительных результатов следует, что хотя модель 3D-ИНМ несколько хуже обусловлена, чем модель 2D-ИНМ, она формально разрешима в используе-

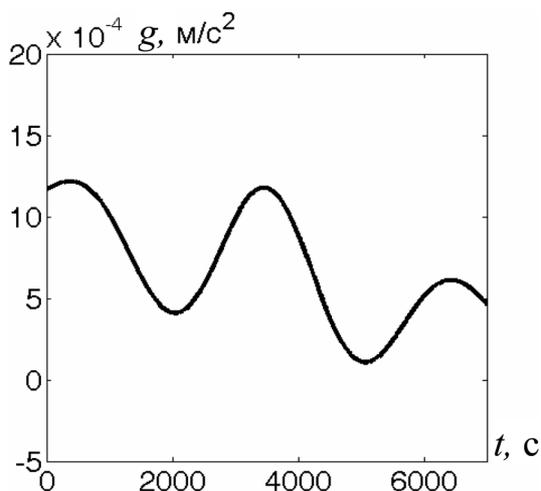


Рис. 1. Гладкая функция $g(t)$

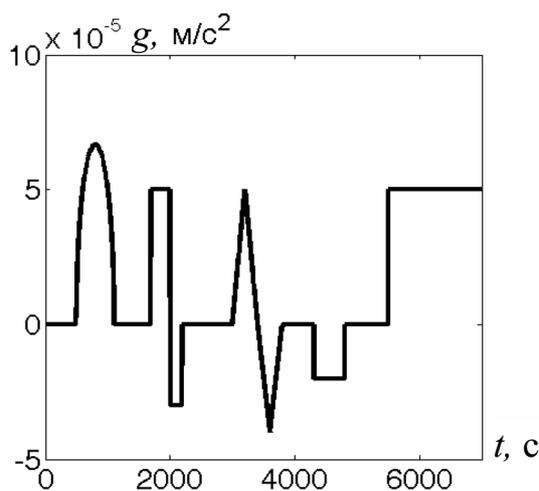


Рис. 2. Разрывная функция $g(t)$

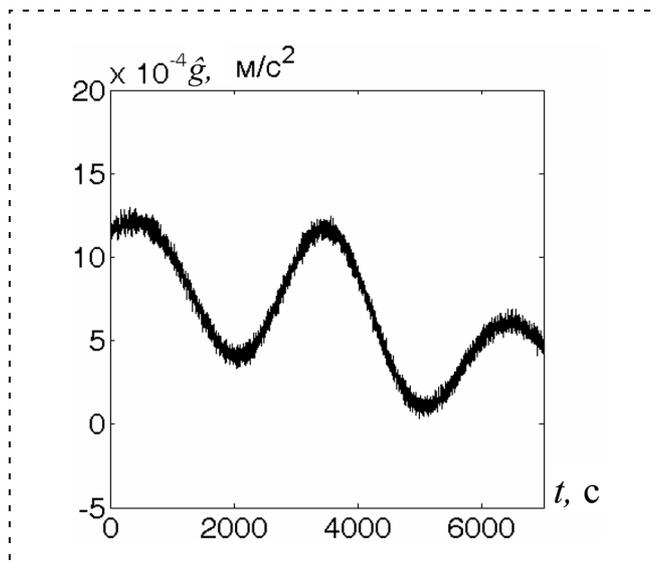


Рис. 3. Оценка ($\hat{g}(t)$) гладкой функции $g(t)$

мой вычислительной среде со стандартной относительной точностью вычислений $\varepsilon_1 \sim 10^{-16}$.

Принимая во внимание, что модель (2) наиболее адаптирована для решения рассматриваемой задачи методом динамического обращения (МДО/DIM) [3], далее приводятся результаты одного из вычислительных имитационных экспериментов, в котором МДО реализован в форме алгоритма Калмана [4].

Здесь следует отметить, что в наиболее вероятной реальной ситуации процесс $g(s)$ (соответственно и $g(t)$) не будет адекватен тому (случайному марковскому), который описан в модели (2). Поэтому в предлагаемом вычислительном эксперименте "реальный" процесс имеет вид, представленный на рис. 1, 2. Вместе с тем, главная особенность ситуации, воспроизводимой в эксперименте, состоит в том, что алгоритм Калмана, решающий задачу в рассматриваемом случае, сконструирован в полном соответствии с исходной структурой модели задачи, представляемой уравнениями (2).

На рис. 3, 4 представлены оценки $\hat{g}(t)$ функций $g(t)$, выполненные калмановским алгоритмом динамического обращения в случае движения объекта вдоль параллели $\varphi = 45^\circ$ в восточном направлении для следующих значений параметров модели (2): $\delta q_i(0) = 50$ м, $\delta p_i(0) = 0,05$ м/с $\forall i = \overline{1,3}$; $g(0) = 10^{-3}$ м/с²; $\sigma_{f_1} = \sigma_{f_2} = 10^{-3}$ м/с²; $\sigma_{f_3} = 10^{-6}$ м/с²; $\lambda_{f_3} = 0,025$ с⁻¹, $\lambda_s = 10^{-7}$ м⁻¹; $\sigma_s = 10^{-3}$ м/с², $\sigma_\varepsilon = 1$ м, $v = 50$ м/с.

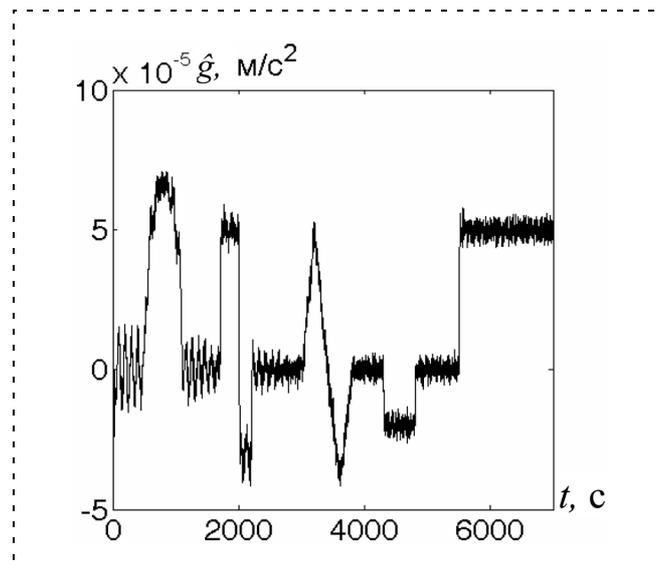


Рис. 4. Оценка ($\hat{g}(t)$) разрывной функции $g(t)$

Как видно из рис. 1—4, решение $\hat{g}(t)$ достаточно точно (со среднеквадратической погрешностью $\sigma \leq 5 \cdot 10^{-5}$ м/с²) воспроизводит вид и особенности функции $g(t)$, причем даже в случае разрывной, строго говоря, физически невозможной функции $g(t)$.

Заключение

Таким образом, в работе в рамках трехкомпонентного метода инерциальной навигации предложена модель гравиинерциальной системы, корректируемой по радиальной информации. Результаты проведенных вычислительных экспериментов свидетельствуют об ее эффективности и прикладной значимости.

Исследование частично поддержано грантами РФФИ-ДВО (№ 09-01-98503-р_восток_a) и ДВО РАН (№ 09-1-П29-02, № 09-III-A-03-066).

Список литературы

1. Девятисильный А. С., Числов К. А. Позиционно корректируемая гравиинерциальная навигационная система // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 4. С. 58—61.
2. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Автоматные системы. М.: Наука, 1966. 580 с.
3. Осипов Ю. С., Кряжимский А. В. Задачи динамического обращения // Вестник РАН. 2006. Т. 76. С. 615—624.
4. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971. 400 с.

А. И. Заведеев, канд. техн. наук, доц.,
Московский авиационный институт
(государственный технический университет)
verazavedeeva@qwertyu.ru

Исследование точности астрономической системы управления ориентацией космического аппарата

Рассмотрена задача анализа точности определения ориентации космического аппарата в инерциальном пространстве по визируемым звездам. Обозначены перспективные направления в развитии методов и алгоритмов точной астроориентации, приспособленных для работы в бортовой цифровой вычислительной системе. Предложены пути снижения погрешности вычисления ориентации для различных законов распределения ошибок измерений астродатчиков и взаимного расположения звезд на небесной сфере.

Ключевые слова: космический аппарат, астрономическая система управления ориентацией, алгоритм, астродатчик, ошибка измерения, ориентация по звездам.

Постановка задачи

Для решения многих современных задач с использованием космических аппаратов (КА) система управления ориентацией (СУО) должна обеспечивать точную угловую ориентацию аппарата в течение заданного интервала времени.

Рассматривается класс КА, на борту которых расположена аппаратура наблюдения (АН), с которой связана визирная система координат (ВСК). Задача заключается в наведении во время сеанса наблюдения ВСК в заданную пространственную точку или район земной поверхности. Выбор характеристик СУО связан с проблемой оценки точности угловой ориентации АН в процессе программного наведения. Ограниченность располагаемой информации, погрешности приборов СУО, динамические ошибки, действие случайных факторов затрудняют или делают невозможным точное отслеживание объекта наблюдения. Возникает стохастическая задача исследования зависимости результирующих погрешностей построения ВСК от элементарных ошибок.

В работах [1, 2] для вычисления на борту КА оценок ориентации в реальном времени предложено использовать алгоритм на базе дискретного фильтра Калмана. Однако в [1, 2] отсутствуют доказательства сходимости оценок вектора состояния и правомерности применения отдельных видов ковариационных матриц погрешностей измерений.

В [3] предложен нелинейный итерационный алгоритм оценки точности определения ориентации

КА в форме ортогональной матрицы, минимизирующей сумму квадратов остаточных невязок по совокупности наблюдаемых звезд. Ограничением данной постановки задачи является требование ортонормированности базисных векторов, составляющих искомую матрицу, которая не всегда представляется собственной ортогональной. Кроме того, в работе не учитывается зависимость дисперсии ошибки оценки ориентации от взаимной конфигурации наблюдаемых звезд.

В [4] автором выполнена оценка точности построения на борту КА ВСК через результирующие погрешности угловой ориентации с применением теории размерных цепей для ряда задач.

Данная статья посвящена исследованию алгоритмов оценки точности астроориентации, приспособленных для работы в бортовой цифровой вычислительной системе (БЦВС) и удовлетворяющих ряду специфических требований (ограничениям по разрядности, объему памяти, сложности и точности вычислительных операций, применению итерационных процедур).

Описание системы ориентации и используемых систем координат

Исследуемая астроинерциальная система включает гироскопический измеритель угловой скорости КА, корректируемый с помощью астродатчиков, комплекс силовых гироскопических исполнительных органов и бортовую вычислительную машину.

На рис. 1 представлены связи между используемыми правыми ортогональными системами координат (СК), астродатчиком (АД) и бортовым звездным каталогом (БЗК), где ИСК, ОСК, БСК, ССК, ВСК, ПСК — инерциальная, орбитальная, базовая (опорная), связанная, визирная, приборная СК соответственно, а также СКМ — СК матрицы фотоприемника с переносом заряда (ФППЗ).

На рис. 2 показано взаимное расположение ПСК $Ox_{п}y_{п}z_{п}$ и СКМ $O'x_{м}y_{м}z_{м}$, а также положение

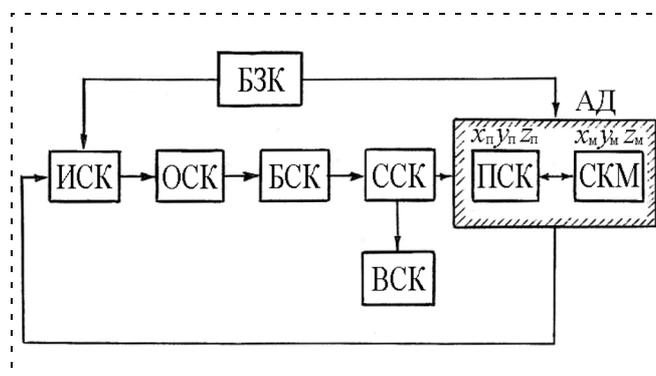


Рис. 1. Последовательность переходов между системами координат

В формулах (9), (10) обозначено: \mathbf{V}^* — матрица направляющих косинусов визируемых звезд в ПСК, \mathbf{v} — матрица ошибок измерений, $\mathbf{P} = \mathbf{V}^* \mathbf{V}^{*\top}$ — симметричная матрица соответствующей размерности, $\mathbf{F} = \mathbf{v} \mathbf{V}^{*\top} - \mathbf{V}^* \mathbf{v}^\top$. След матрицы \mathbf{P} равен N [3], следовательно, собственную матрицу системы (10) можно представить в виде

$$\mathbf{C} = \mathbf{F} - \lambda \mathbf{I} = \mathbf{F} - \mathbf{M}.$$

Поскольку $\text{tr} \mathbf{P} = N$, то для определения ковариационной матрицы вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ вместо (10) примем эквивалентную систему

$$\mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} = \sum_{k=1}^N \mathbf{v}_k$$

и, учитывая взаимную независимость ошибок в измерениях отдельных звезд, получим

$$\mathbf{K}_w = M(\boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}^\top) = \mathbf{C}^{-1} M \left(\sum_{k=1}^N \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^\top \right) (\mathbf{C}^{-1})^\top, \quad (11)$$

где tr — след матрицы, $M(\dots)$ — оператор осреднения по множеству.

Для ковариационной матрицы ошибок измерений АД можно записать

$$M(\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^\top) = \frac{\sigma^2}{2} (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^\top). \quad (12)$$

Подставляя (11) в (10), найдем

$$M(\boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}^\top) = \mathbf{C}^{-1} \frac{\sigma^2}{2}.$$

Из свойства ортогонального подобия \mathbf{P} и $\mathbf{A} \mathbf{A}^\top$ получим формулу для дисперсии угловой ошибки оценки ориентации

$$\sigma^2(\varphi) = \frac{\sigma^2}{2} \text{tr} \mathbf{C}^{-1}$$

или с использованием собственных значений

$$\sigma^2(\varphi) = \frac{\sigma^2}{2} \sum_{i=1}^3 (N - \mu_i)^{-1},$$

где μ_i ($i = 1, \dots, 3$) — собственные значения матрицы.

Дисперсия угла φ принимает минимальное значение в случае одинаковых собственных значений, равных $N/3$. Тогда получим

$$\sigma(\varphi) = \frac{3\sigma}{2\sqrt{N}}.$$

Определение погрешности астроориентации по группе звезд

Введем вектор конечного поворота $\boldsymbol{\varepsilon}$ с углом $\varphi = \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}^\top \boldsymbol{\varepsilon}}$, переводящим ПСК, связанную с астродатчиком, в некоторую произвольную ортогональную промежуточную систему координат (ПрСК) $Ow_1w_2w_3$ с помощью матрицы \mathbf{W} .

Для ковариационной матрицы \mathbf{K}_w проекций ε_{1w} , ε_{2w} , ε_{3w} вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ на оси ПрСК

$$\mathbf{K}_w = M(\boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}^\top)$$

можно принять любую СК, в которой известны проекции векторов визирования звезд s_i ($i = 1, \dots, N$), где N — число звезд.

Значение следа матрицы \mathbf{K}_w представим в виде

$$R = \text{tr}(\mathbf{K}_w) = \sigma_{1w}^2 + \sigma_{2w}^2 + \sigma_{3w}^2,$$

где σ_{1w} , σ_{2w} , σ_{3w} — среднеквадратические отклонения (СКО) случайных величин ε_{1w} , ε_{2w} , ε_{3w} соответственно.

Величина R не зависит от ориентации базиса $Ow_1w_2w_3$. Пусть M_φ и σ_φ — математическое ожидание (МО) и СКО случайной величины φ . Учитывая (7), можно записать

$$R = M(\varphi^2) = M_\varphi^2 + \sigma_\varphi^2. \quad (13)$$

Оценим погрешности астроориентации в зависимости от закона распределения ошибок измерений звезд.

Оценка при произвольном законе распределения

Пусть погрешности измерений x_{si} , y_{si} ($i = 1, \dots, N$) астродатчиком положений звезд с помощью матрицы ФППЗ независимы, имеют нулевые МО, а закон их распределения неизвестен. Рассмотрим значение

$$\zeta = M_\varphi + a\sigma_\varphi, \quad (a > 0). \quad (14)$$

Используя неравенство Чебышева для симметричного относительно моды распределения, дающее оценку сверху для случайной величины φ , получим

$$P(|\varphi - M_\varphi| \geq a\sigma_\varphi) \geq P(\varphi - M_\varphi \geq a\sigma_\varphi) \leq \frac{4}{9a^2}. \quad (15)$$

Из определения вероятности случайной величины следует

$$P(\varphi > \zeta) = 1 - P(\varphi < \zeta) \leq \frac{4}{9} \frac{1}{a^2}.$$

С учетом (13), выражение (14) можно представить в виде

$$\zeta = M_\varphi + a\sqrt{R - M_\varphi^2},$$

откуда

$$a = \frac{\xi - M_\varphi}{\sqrt{R - M_\varphi^2}}. \quad (16)$$

Вводя обозначение $\upsilon = 1 - a^{-2}$ и подставляя (16), получим

$$\upsilon = 1 - \frac{4}{9} \frac{R - M_\varphi}{(\zeta - M_\varphi)^2}.$$

Приравняв частную производную $\partial\upsilon/\partial M_\varphi$ нулю, найдем точку экстремума $M_\varphi = R/\zeta$, которая при выполнении условий $M_\varphi < \zeta$ и $R > M_\varphi^2$ соответствует точке минимума, а функция υ принимает в ней минимальное значение

$$\upsilon_{\min} = 1 - \frac{4}{9} \frac{R}{\zeta^2 - R}.$$

Найденное значение υ_{\min} является нижней оценкой вероятности $P(\varphi < \zeta)$, поэтому окончательно расчетная формула примет вид

$$P(\varphi < \zeta) = \begin{cases} 1 - \frac{4}{9} \frac{R}{\zeta^2 - R}, & \zeta \geq \frac{\sqrt{13R}}{3}, \\ 0, & \zeta < \frac{\sqrt{13R}}{3}. \end{cases} \quad (17)$$

Формула (17) представляет собой предельную оценку, с помощью которой можно получить зависимость допустимой погрешности измерений АД положений звезд исходя из доверительной вероятности этой погрешности

$$\zeta = \sqrt{R \left(1 + \frac{4}{9(1 - P^0)} \right)}, \quad (18)$$

где $P^0 = P(\varphi < \zeta)$ — доверительная вероятность.

При одинаковой дисперсии погрешности измерений АД след матрицы R представим как $R = \sigma_\varphi^2 R^*$, тогда выражение (18) примет вид

$$\zeta = \sigma_\varphi \sqrt{R^* \left(1 + \frac{4}{9(1 - P^0)} \right)}. \quad (19)$$

Оценка при нормальном законе распределения

Пусть погрешности измерений АД независимы и имеют нормальный закон распределения с нулевыми математическими ожиданиями. Вращением ортонормированный базис $Ow_1w_2w_3$ можно перевести в базис $Oq_1q_2q_3$, проекции $\varepsilon_{1q}, \varepsilon_{2q}, \varepsilon_{3q}$ вектора ε на оси которого взаимно некоррелированы, а сами оси являются главными осями рассеивания. Эллипсоид E_k равной плотности вероятностей в координатах (q_1, q_2, q_3) описывается каноническим уравнением

$$\frac{q_1^2}{\sigma_{q_1}^2} + \frac{q_2^2}{\sigma_{q_2}^2} + \frac{q_3^2}{\sigma_{q_3}^2} = k^2,$$

а вероятность $P(\varepsilon \in E_k)$ попадания вектора ε в эллипсоид E_k вычисляется в результате тройного интегрирования совместной плотности вероятностей $f(\varepsilon_{1q}, \varepsilon_{2q}, \varepsilon_{3q})$ по поверхности E_k . В результате получим

$$P(\varepsilon \in E_k) = \Phi(k) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} k e^{-\frac{k^2}{2}}, \quad (20)$$

где $\Phi(k) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^k e^{-u^2} du$ — интеграл вероятности.

Сведем задачу к одномерному случаю относительно угла конечного поворота φ .

Пусть S_k — сфера радиуса $\zeta = k\sqrt{R}$. Из условия $\sigma_{q_1}^2 + \sigma_{q_2}^2 + \sigma_{q_3}^2 = R$ следует, что $\sigma_m \leq \sqrt{R}$, где $\sigma_m = \max \sigma_{q_i}$ ($i = 1, 2, 3$).

Если $P(\varepsilon \in S_k)$ — вероятность попадания вектора ε в сферу S_k , то справедливо соотношение

$$P(\varepsilon \in E_k) \leq P(\varepsilon \in S_k).$$

В этом случае в качестве нижней оценки можно принять

$$P(\varphi < \zeta) = P(\varepsilon \in E_k).$$

Окончательно с учетом (20) интегральный закон распределения величины φ примет вид

$$F(\zeta) = P(\varphi < \zeta) = \begin{cases} \Phi\left(\frac{\zeta}{\sqrt{R}}\right) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \zeta e^{-\frac{\zeta^2}{2R}}, & k \geq 0; \\ 0, & k < 0. \end{cases}$$

При одинаковой дисперсии погрешности измерений АД ($R = \sigma_\phi^2 R^*$) последнюю формулу запишем в виде

$$P(\varphi < k\sigma_\phi) = \begin{cases} \Phi\left(\frac{k}{\sqrt{R^*}}\right) - \sqrt{\frac{2}{\pi R^*}} k e^{-\frac{k^2}{2R^*}}, & k \geq 0; \\ 0, & k < 0. \end{cases} \quad (21)$$

Способы повышения точности астроориентации

Согласно выражению (18) для снижения погрешности определения ориентации целесообразно уменьшать значение R . Из (19) следует, что погрешность рассчитанной ориентации можно рассматривать как две независимые части. Одна из них связана с погрешностью АД и представлена дисперсией σ_ϕ^2 , другая зависит только от взаимного положения звезд и представлена величиной R^* .

Повысить точность астроориентации можно снижением ζ за счет уменьшения погрешности АД или увеличения параметра n , который можно рассматривать как число звезд в одном кадре наблюдения или как общее число измерений по совокупности кадров.

Можно показать, что при выполнении не слишком жестких ограничений [5] минимальное значение следа R определяется выражением

$$\tilde{R}_{\min} = \frac{9}{2 \sum_{i=1}^n (1/\sigma_i^2)}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

При одинаковой дисперсии погрешности измерений σ_i^2 выполняется условие

$$R_{\min}^* \geq \tilde{R}_{\min}^* = \frac{9}{2n}. \quad (22)$$

Таким образом, при условии (22) обеспечивается предельная точность рассчитанной ориентации, а взаимное расположение звезд в случае $R^* = \tilde{R}_{\min}^*$ представляет собой оптимальную конфигурацию из n звезд.

Результаты математического моделирования

Проводилось математическое моделирование погрешности астроориентации для граничного (17) и нормального (21) законов распределения при круговом поле зрения АД.

Рассматривались варианты построения астросистемы, включающей один и два АД с ортогональными осями визирования. Анализ зависимости $P(\varphi < k\sigma_\phi)$ от k для различных звездных величин M показал, что наименьшее значение погрешности

$\chi = \sqrt{R}$, обусловленной случайным рассеиванием с увеличением M и числа используемых АД снижа-

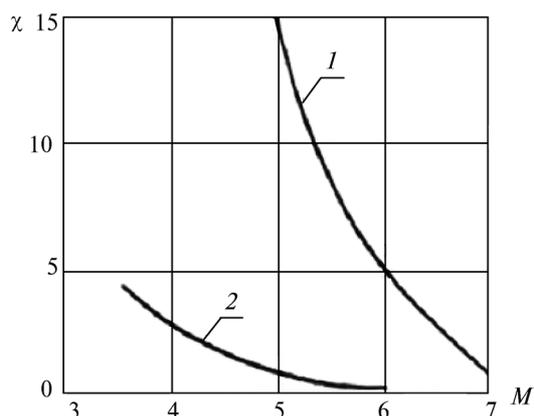


Рис. 3. Зависимость $\chi(M)$ для астросистемы, включающей один (1) или два (2) астродатчика

ется. На рис. 3 показана зависимость $\chi(M)$ для случаев одного и двух астродатчиков.

Заключение

В результате проведенного исследования были получены следующие результаты.

1. Рассмотрены перспективные направления в развитии методов и алгоритмов точной астроориентации, приспособленных для работы в БЦВС.

2. Выполнена оценка точности расчета ориентации КА, сводящаяся к минимизации функционала от невязки положения визируемых звезд по данным БЗК и измерениям АД в ПСК.

3. Анализ показал, что при одинаковых СКО измерений по полю зрения АД погрешность ориентации включает две независимые части: погрешность АД и ошибки, связанные с конфигурацией звезд на небесной сфере.

4. Исследование показывает, что уменьшить погрешность вычисленной ориентации можно как путем снижения погрешности АД, так и за счет увеличения числа проведенных измерений.

Список литературы

1. Junkins J., White C., Turner J. Star Pattern Recognition for Real Time Determination // Journal of the Astronautical Sciences. 1977. Vol. 25. № 3. P. 251–270.
2. Vathsal S. Nonlinear Filtering for Spacecraft Attitude Estimation // AIAA 24-th Aerospace Sciences Meeting. AIAA Paper 86-0253, Jan. 1986.
3. Катаргин М. Ю. Алгоритм среднеквадратичной оценки ориентации космических аппаратов и его погрешности // Космические исследования. 1986. Т. 24. № 6. С. 826–830.
4. Заведеев А. И. Астродатчик в системе управления ориентацией космического аппарата // Тр. XVI международного научно-технического семинара "Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации". Алушта. 2007. С. 190–191.
5. Гладыревский А. Г. Определение ориентации по звездам и оценка ее точности при неоднородном распределении погрешности измерения по полю зрения. Вестник МЭИ. 2002. № 5. С. 11–16.

Н. К. Ивченко, д-р техн. наук, проф.,

А. В. Ивченко, канд. техн. наук,

Московский государственный университет

приборостроения и информатики

professor55@rambler.ru

Аналитический подход к проблеме монтажных искажений быстровращающейся опоры гиросприбора

Рассматривается ключевая задача для технологической проблемы монтажных искажений быстровращающейся опоры и связанной с ней проблемы стабильности точностных характеристик при создании и совершенствовании класса высокоточных приборов. Применен математический аппарат теории упругости, проблема сформулирована как краевая задача, для которой дана постановка и определен метод решения. Полученное приближенное аналитическое решение позволяет осуществлять поиск конструктивных решений, защищающих беговую дорожку высокоскоростного подшипника от монтажных искажений.

Ключевые слова: высокоскоростной подшипник, математическое моделирование, краевая задача теории упругости, аналитическое решение, стабильность точностных характеристик, класс высокоточных приборов.

Командные гироскопические приборы составляют основу современных информационно-измерительных и управляющих систем. В практике использования приборов стабильность точностных характеристик является одной из основных проблем, от решения которой зависит качество реализуемых систем. Создание и совершенствование класса высокоточных приборов в определенной степени связано с обеспечением сохранения форм, размеров и взаимного расположения деталей и элементов конструкции. Общеизвестно, насколько точность прибора зависит от технологических особенностей конструкции [1–4]. Важность решения проблемы влияния погрешностей изготовления и сборки обуславливает необходимость математического моделирования [5].

При изготовлении чувствительных элементов гироскопической платформы существует производственная проблема монтажных искажений наружного кольца фланцевого высокоскоростного подшипника — образование овальности беговых дорожек [6].

Устанавливаемые в приборах подшипники изготавливаются в пределах жестких допусков, однако при монтаже подшипникового узла прибора возникают искажения беговых дорожек колец. Проведенный комплекс экспериментальных исследований показал, что у ряда приборов после обкатки подшипников происходит изменение штатного выходного параметра — начального времени выбега ротора — в сторону его уменьшения, а это, как пра-

вило, указывает на усугубление износных процессов. Обычная обкатка происходит, как свидетельствуют последующие после монтажа измерения неровностей беговых дорожек, с уменьшением искажений. Еще определенно не установлено, при каких формах начальных искажений профиля обкатка не достигает цели, но очевидно, что целесообразно реализовать монтаж, по возможности, с меньшими искажениями. Сравнение состояний беговых дорожек подшипника до установки в корпусе прибора и после сборки показало, что изменение профиля по овалу может быть большим, чем в шесть раз, причины, вызывающие искажения при сборке, связаны с упругим деформированием деталей, зависящим от условий крепления.

Основная идея — ослабить влияние монтажных искажений для сохранения формы беговой дорожки. Возникает теоретическая задача создания математических моделей для анализа и поиска конструктивных решений, защищающих беговую дорожку от монтажных искажений опоры гиросприборов.

Данную техническую проблему необходимо решать только с позиций теории упругости, сформулировав и поставив как краевую задачу теории упругости.

Математическое моделирование задачи связано с анализом системы уравнений для сплошных сред и требует точной постановки с использованием трехмерных уравнений теории упругости с возможностью формулировки моделей динамических процессов.

Математическая постановка задачи

Будем рассматривать уравнения в перемещениях в цилиндрической системе координат (r, φ, z) [7].

Введя следующие обозначения частных производных: штрих — производная по радиусу, черта — производная по углу, точка — по длине, звездочка — по времени, имеем уравнения равновесия в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & u'' + \frac{u'}{r} + \ddot{u} + \frac{\bar{u}}{r^2} + \frac{u'' + \frac{u'}{r} - \frac{u}{r^2} + \dot{w}' + \left(\frac{\bar{v}}{r}\right)'}{1 - 2\mu} - \\
 & - 2\frac{\bar{v}}{r^2} - \frac{u}{r^2} - \frac{u^{**}}{\Delta^2} = 0; \\
 & v'' + \frac{v'}{r} + \ddot{v} + \frac{\bar{v}}{r^2} + \frac{\bar{u}' + \bar{w}' + \frac{u + \bar{v}}{r}}{r(1 - 2\mu)} + \\
 & + 2\frac{\bar{u}}{r^2} - \frac{v}{r^2} - \frac{v^{**}}{\Delta^2} = 0; \\
 & w'' + \frac{w'}{r} + \ddot{w} + \frac{\bar{w}}{r^2} + \frac{\dot{u}' + \dot{w}' + \frac{\dot{u} + \dot{v}}{r}}{1 - 2\mu} - \frac{w^{**}}{\Delta^2} = 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где u, v, w — компоненты вектора перемещений, соответственно, радиальная, окружная, осевая; Δ^2 — квадрат скорости распространения волн сдвига, определяемый отношением модуля сдвига G к плотности; μ — коэффициент Пуассона.

Редукция системы уравнений позволила

- из последнего уравнения системы выразить неизвестное \dot{v} :

$$\frac{\dot{v}}{r} = -\dot{u}' - \frac{\dot{u}}{r} - \ddot{w} - (1 - 2\mu)\left(w'' + \frac{w'}{r} + \ddot{w} + \frac{\bar{w}}{r^2} - \frac{w^{**}}{\Delta^2}\right); \quad (2)$$

- исключить неизвестную v из первого уравнения равновесия системы:

$$\begin{aligned} & \dot{u}'' + 3\frac{\dot{u}'}{r} + \frac{\dot{u} + \bar{u}}{r^2} + \ddot{u} - w''' + \\ & + (1 - 4\mu)\frac{w''}{r} + (3 - 4\mu)\frac{w'}{r^2} - \ddot{w}' - \frac{\bar{w}'}{r^2} + \\ & + 4(1 - \mu)\left(\frac{\dot{w}}{r} + \frac{\bar{w}}{r^3}\right) - \frac{u^{**} - w' + (1 - 2\mu)\frac{w^{**}}{r}}{\Delta^2} = 0; \quad (3) \end{aligned}$$

- определить уравнение, которое является разрешающим, оно содержит единственную неизвестную — осевое перемещение:

$$\begin{aligned} & w'''' + 2\frac{w'''}{r} - \frac{w''}{r^2} + \frac{w'}{r^3} + 2\frac{\bar{w}''}{r^2} - 2\frac{\bar{w}'}{r^3} + \\ & + 4\frac{\bar{w}}{r^4} + \frac{\bar{w}}{r^4} + 2\ddot{w}'' + 2\frac{\ddot{w}'}{r} + 2\frac{\bar{w}}{r} + \ddot{w} - \\ & - \left(1 + \frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}\right) \frac{w'' + \frac{w'}{r} + \frac{w^{**}}{r^2}}{\Delta^2} + \frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)} \frac{w^{****}}{\Delta^4} = 0. \quad (4) \end{aligned}$$

Наряду с разрешающим уравнением должны быть сформулированы граничные условия.

Для граничных условий в режиме заданных нагрузок служат выражения компонентов напряженного состояния, которые в принятых обозначениях можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_r}{2G} &= u' + \frac{\mu}{1 - 2\mu} \left(u' + \frac{u + \bar{v}}{r} + \dot{w}\right); \\ \frac{\sigma_t}{2G} &= \frac{u + \bar{v}}{r} + \frac{\mu}{1 - 2\mu} \left(u' + \frac{u + \bar{v}}{r} + \dot{w}\right); \\ \frac{\sigma_z}{2G} &= \dot{w} + \frac{\mu}{1 - 2\mu} \left(u' + \frac{\bar{v} + u}{r} + \dot{w}\right); \\ \frac{\tau_{rt}}{G} &= v' - \frac{v - \bar{u}}{r}; \quad \frac{\tau_{zt}}{G} = \dot{v} + \frac{u + \bar{w}}{r}; \quad \frac{\tau_{rz}}{G} = \dot{u} + w'. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z, \tau_{rt}, \tau_{zt}, \tau_{rz}$ — радиальная, окружная, осевая и касательные (rt), (zt), (rz) составляющие напряжения.

При построении приближенного аналитического решения примем осевое направление за основное, тогда остальные неизвестные задачи должны быть выражены через w .

Для начального приближения, чтобы в выражении радиального перемещения сохранить фундаментальные традиционные решения вида $u = \frac{A}{r} + Br$, в уравнении

$$\dot{u} = -w' + \frac{\tau_{rz}}{G}$$

аппроксимируем линейно по радиусу через крайние значения задаваемой на границе нагрузки касательные напряжения в виде

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{rz}}{Gr} &\cong \frac{\tau_{\rho z} + \tau_{Rz}}{2G} + \frac{\tau_{\rho z} - \tau_{Rz}}{2G} \left(\frac{R + \rho - 2r}{R - \rho}\right); \\ \frac{\tau'_{rz}}{G} &\cong \frac{\tau_{Rz} - \tau_{\rho z}}{G(R - \rho)}; \\ \frac{\tau_{rz}r}{G} &\cong \frac{R\tau_{Rz} + \rho\tau_{\rho z}}{2G} - \frac{R\tau_{Rz} - \rho\tau_{\rho z}}{2G} \left(\frac{R + \rho - 2r}{R - \rho}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

где R и ρ — внешний и внутренний радиусы цилиндра.

Запишем уравнение равновесия в радиальном направлении с учетом принятых аппроксимаций:

$$\begin{aligned} f &= (\dot{u}r)'' - \frac{(\dot{u}r)'}{r} = w''''r + (1 + 4\mu)w'' - \\ & - (1 - 4\mu)\frac{w'}{r} + 2\ddot{w}'r + 2\frac{\bar{w}'}{r} - 4(1 - \mu)\left(\frac{\bar{w}}{r^2} - \ddot{w}\right) - \\ & - \frac{2}{\Delta^2} (\bar{w}'r - (1 - 2\mu)\bar{w}) + \Phi, \end{aligned} \quad (7)$$

здесь

$$\begin{aligned} \Phi &= -2\frac{\tau_{Rz} - \tau_{\rho z}}{G(R - \rho)} - 2\frac{\rho}{2G} \frac{\tau_{\rho z} + \tau_{Rz}}{R} - \\ & - 2\frac{\rho}{2G} \frac{\tau_{\rho z} - \tau_{Rz}}{R} \left(\frac{R + \rho - 2r}{R - \rho}\right) - \frac{\bar{\tau}_{\rho z} + \bar{\tau}_{Rz}}{2G} - \\ & - \frac{\bar{\tau}_{\rho z} - \bar{\tau}_{Rz}}{2G} \left(\frac{R + \rho - 2r}{R - \rho}\right) - \frac{R\ddot{\tau}_{Rz} + \rho\ddot{\tau}_{\rho z}}{2G} - \frac{R\tau_{Rz}^{**} + \rho\tau_{\rho z}^{**}}{2G\Delta^2} - \\ & - \left(\frac{R + \rho - 2r}{R - \rho}\right) \left[\frac{R\ddot{\tau}_{Rz} - \rho\ddot{\tau}_{\rho z}}{2G} + \frac{R\tau_{Rz}^{**} - \rho\tau_{\rho z}^{**}}{2G\Delta^2}\right]. \end{aligned}$$

После интегрирования уравнения для радиальных перемещений возникает аналитическое приближение, обобщающее решение ЛАМЕ, вида

$$\dot{u} = \frac{A}{r} + Br - \frac{1}{r} \int \frac{fr}{2} dr + r \int \frac{f}{2r} dr. \quad (8)$$

Остальные неизвестные задачи теперь могут быть выражены через единственную искомую функцию — осевое перемещение.

Таким образом, краевая задача теории упругости для цилиндра в режиме заданных на контуре нагрузок математически поставлена и сформулирована так, что определено разрешающее уравнение для функции осевых перемещений, граничные условия могут быть удовлетворены для шести функций, включая две, полученные от интегрирования и входящие в выражение радиальных перемещений. Для решения можно применить метод краевой интерполяции с аппроксимацией формы решения полиномами. Это приближение строится на основе модификации ряда Тейлора, которая в краевых задачах опирается на границы области и значительно усиливает способ решения степенными функциями.

Построение аналитического приближенного решения

Построение аналитического приближения по краевым значениям для разрешающего уравнения четвертого порядка по радиусу будем выполнять полиномом минимально допустимой степени по радиусу. Таким образом, из частичных сумм ряда по краевым значениям используем структуру четвертого порядка, содержащую пять искомых функций других измерений, вида

$$\begin{aligned} w = & \frac{a_0 + b_0}{2} + \frac{a_0 - b_0}{2} \left(\frac{R + \rho - 2r}{R - \rho} \right) \left(1 + 2 \frac{(R-r)(r-\rho)}{(R-\rho)^2} \right) + \\ & + \frac{a_1 + b_1}{2} \left(\frac{R + \rho - 2r}{R - \rho} \right) \frac{(R-r)(r-\rho)}{(R-\rho)} + \\ & + \frac{a_1 - b_1}{2} \left(1 + \frac{(R-r)(r-\rho)}{(R-\rho)^2} \right) \frac{(R-r)(r-\rho)}{(R-\rho)} + \\ & + \frac{a_2 + b_2}{2} \frac{(R-r)^2(r-\rho)^2}{2(R-\rho)^2}. \end{aligned}$$

Форма аналитического решения содержит сумму и разность значений функции w : a_0 — на внутреннем радиусе ρ и b_0 — на внешнем радиусе R цилиндра, а также сумму и разность значений i -х производных функции w : a_i — на внутреннем и b_i — на внешнем радиусах цилиндра.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} a_0 + b_0 &= X, \quad a_0 - b_0 = Y, \\ a_1 + b_1 &= Z, \quad a_1 - b_1 = T, \quad a_2 + b_2 = \Lambda \end{aligned}$$

и выразив структуру по степеням радиальной координаты в виде

$$w = C_0 + C_1 r + C_2 \frac{r^2}{2} + C_3 \frac{r^3}{6} + C_4 \frac{r^4}{24},$$

где

$$\begin{aligned} C_0 = & \frac{X}{2} + \frac{Y}{2} \left(\frac{R + \rho (R - \rho)^2 - 2\rho R}{(R - \rho)^2} \right) - \frac{Z}{2} \frac{R\rho(R + \rho)}{(R - \rho)^2} + \\ & + TR \left(\frac{2R\rho^2}{(R - \rho)^3} - \frac{\rho}{R - \rho} \right) + \Lambda \frac{R^2 \rho^2}{4(R - \rho)^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_1 = & \frac{Y}{2} \left[\frac{2(R + \rho)^2}{(R - \rho)^3} - \frac{2(R - \rho)^2 - 4R\rho}{(R - \rho)^3} \right] + \frac{Z}{2} \left[\frac{(R + \rho)^2}{(R - \rho)^2} + \right. \\ & \left. + 2 \frac{R\rho}{(R - \rho)^2} \right] + \frac{T}{2} \left[\frac{R + \rho}{R - \rho} - \frac{2\rho R(R + \rho)}{(R - \rho)^3} \right] - \frac{\Lambda R}{2} \frac{2\rho(R + \rho)}{(R - \rho)^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2 = & -\frac{Y}{2} \frac{6(R + \rho)}{(R - \rho)^3} - \frac{Z}{2} \frac{3(R + \rho)}{(R - \rho)^2} - \\ & - \frac{T}{2} \left[\frac{1}{R - \rho} - \frac{(R + \rho)^2 + 2\rho R}{(R - \rho)^3} \right] + \frac{\Lambda}{2} \frac{(R + \rho)^2 + 2\rho R}{(R - \rho)^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_3 = & \frac{Y}{2} \frac{4}{(R - \rho)^3} + \frac{Z}{2} \frac{2}{(R - \rho)^2} - \\ & - \frac{T}{2} \frac{2(R + \rho)}{(R - \rho)^3} - \frac{\Lambda}{2} \frac{2(R + \rho)}{(R - \rho)^2}; \end{aligned}$$

$$C_4 = \frac{T}{2} \frac{1}{(R - \rho)^3} + \frac{\Lambda}{2} \frac{1}{(R - \rho)^2},$$

можно в общих значениях и с использованием двух констант интегрирования представить радиальное перемещение в выражении (8).

Точное удовлетворение граничным условиям

$$\frac{\dot{\sigma}_r}{2G} = \dot{u}' - \mu \left(w'' + \frac{w'}{r} + \ddot{w} + \frac{\bar{w}}{r^2} - \frac{\bar{w}^*}{\Delta} \right);$$

$$\frac{\tau_{rz}}{G} = \dot{u} + w';$$

$$\begin{aligned} \frac{\dot{\tau}_{r\theta}}{G} = & \frac{\dot{u} + \bar{u}}{r} - \dot{u}' - \dot{u}'' r - \dot{w}' r - \\ & - (1 - 2\mu) \left(w''' r + w'' - \frac{w'}{r} + \frac{\bar{w}'}{r} + \ddot{w} r - \frac{2\bar{w}}{r^2} - \frac{\bar{w}^* r}{\Delta} \right) \end{aligned}$$

и в среднем разрешающем уравнении (4) позволит определить искомые функции формы аналитического решения для осевого перемещения и констант интегрирования в выражении (8) для радиального перемещения.

Заключение

Полученное приближенное аналитическое решение краевой задачи можно применить для анализа конструктивных форм скоростных подшипниковых опор и причин возникновения искажений беговой дорожки наружного кольца при закреплении его в корпусе. Конструктивные формы скоростных подшипниковых опор, применяемых в прецизионном приборостроении, могут быть аппроксимированы сравнительно малым числом цилиндров, стыкуемых по торцам. Прижим винтами фланца можно схематизировать как неосесимметричное нагружение осесимметричного цилиндра, упругие деформации которого передаются с тем или иным затуха-

нием на беговую дорожку наружного кольца. Такая постановка для конкретных приборов позволит составить качественное представление о распространении местных возмущений и оценить теоретически беговую дорожку на чувствительность к монтажным искажениям.

Список литературы

1. **История** механики гироскопических систем. М.: Наука, 1975. 127 с.
2. **Ишлинский А. Ю.** Механика гироскопических систем. М.: АН СССР, 1963. 482 с.
3. **Пельпор Д. С.** Гироскопические системы. М.: Высш. шк., 1971.
4. **Ривкин С. С.** Теория гироскопических устройств. Л.: Судпромгиз, 1969. 507 с.
5. **Павловский М. А.** Влияние погрешностей изготовления и сборки приборов на их точность. Киев.: Изд. Киевского университета, 1973. 193 с.
6. **А. с. 456098 СССР**, МКИ F 16с 43/00. Крепление фланцевого шарикоподшипника, 1975.
7. **Безухов Н. И.** Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высш. шк., 1968. 612 с.

Информация



2-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ
ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ

«INDUSTRYEXPO.
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ УРАЛА —
СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ И РЕНОВАЦИИ»

- Технологии, оборудование и услуги для предприятий горно-металлургической отрасли
- Промышленная безопасность
- Покртия и обработка поверхности
- Технологии, оборудование и услуги для предприятий энергетической отрасли
- Экология промышленных предприятий

28-30 ОКТЯБРЯ 2009

Центр Международной Торговли, Екатеринбург

Организаторы:



Тел.: +7 (812) 380 6002

+7 (812) 380 6000

Факс: +7 (812) 380 6001

E-mail: industry@primexpo.ru

www.industryexpo.ru

CONTENTS

- Perepelkin E. A.** Numerical Solution of the Modal Synthesis Problem for System with Output Feedback 2
The nature of dependence of the characteristic polynomial of the closed system matrix on feedback coefficients is considered. An algorithm to reduce the number of variables and equations in the problem of modal synthesis is described. This algorithm is applied to solving the problem of the synthesis of stabilizing control of lateral motion of the aircraft.
Keywords: output feedback, modal synthesis, lateral motion of the aircraft.
- Kochemasov A. V., Volodin V. V.** Definition of Singular Solutions of Boundary Value Problems in Dynamic Systems on the Basis of Decomposition Procedure on the Orthogonal Subspaces 7
We offered on the basis of decomposition procedure on orthogonal subspaces to gain out singular components of the complete solution of the differential equations of the complicated dynamic system, which correspond to singular points of domain boundaries of stability.
Keywords: singular solutions, singular points, the regular solutions, a full solution, an orthogonalization, orthogonal decompositions, coefficients of transfer of separate contours of system, dynamic system.
- Parsunkin B. N., Andreev S. M., Ishmetiev E. N., Usachev M. V., Mikhalchenko E. S., Nalivkin A. K.** Synthesis of Control Optimization System of the High-Power Electric Arc Furnace EAF-180 Electric Conditions 11
The control optimization system of the EAF-180 electric conditions was developed. The greatest possible productivity hour by maintenance the highest power of arc was reasonable chosen as an objective of the control optimization of the High-power EAF-180 electric conditions. The analysis of functioning of the proposed automatic optimization system implemented on a computerized test stand is presented. The block scheme of the proposed power conditions correction method of the electric arc melting process has been developed.
Keywords: Electric Arc Furnace, electric conditions, criterion of optimization, electric power, system of automatic optimization, correction of a power conditions.
- Korostelev V. F., Chromova L. P., Rasskazchikov A. N.** Management of the Crystallisation's Process of Alloy B95. 18
Results of researches of crystallisation of high-strength aluminium alloy B95 in the conditions of imposing of pressure 400 MPa are presented. It is established, that compressibility of crystallizing metal can reach 12,4 %. Due to management of parameters of process reached kvazisolid condition before the beginning of crystallization, compaction of dendrite cells and easymelting eutectica during crystallization. Under equal toughness with the deformed metal poured alloy B95 in stocking up by sizes $\varnothing 90 \times 180$ mm have in 1,2 times more high limit of fluidity.
Keywords: object with the latent properties, elasticity, compressibility, pulse-width modulation, control system.
- Anurov Yu. M., Pushkarev A. D., Kuptsov A. B., Maxiytin M. M.** Synergetic Control on Turbo-Generator with Brushless Excitation System 25
The article describes up-to-date control methods for turbo-generators with brushless excitation system and synthesizes control algorithms and equations of turbo-generator state non-linear observer within the synergetic control theory.
Keywords: turbo-generator, automatic control system, excitation system, regulator, observer, synergetics.
- Storablev M. L.** The Valuation of the Accuracy and the Stability of the Workflows 31
The accuracy indexes and the stability indexes of the workflows are considered. The expressions for the calculation of the accuracy indexes of the workflows, which permit to make valuation of the workflows' accuracy during the workflows, are developed on the basis of the sensitivity theory.
Keywords: the accuracy, the stability, the quality, the workflows, the sensitivity theory factors.
- Kosinsky M. Yu., Shikhin V. A.** The Use of Fuzzy Models for Automatized Systems Operational Reliability Analysis. 35
Fuzzy sets application for automatized systems operational reliability analysis is studied in this paper. The main factors that affect such systems' reliability are extracted and overviewed. As a result, the new method of operational reliability analysis is proposed and tested.
Keywords: reliability, fuzzy sets theory, automatized systems.
- Ignatjev S. A., Ignatjev A. A., Ivaschenko V. A.** Automated Systems of Monitoring of the Technical Condition of Technological Equipment. 43
The article presents a new approach to the automated systems of monitoring of the technical condition of industrial enterprises' technological equipment which helps in appropriate decision making within the process of its maintenance.
Keywords: automated systems of monitoring, technical condition, technological equipment, maintenance of equipment.

- Knyazj V. A., Krychenkov V. F., Matveev I. A., Murynin A. B., Saltykova E. B.** Diagnostics of Human Vision Pathology Based of Anthropometrical Data Obtained by Machine Vision Technique 48
Problem of vision pathology diagnosis automation is being studied with assistance of computer stereo vision technologies. Several algorithms for face asymmetry evaluation are analyzed. Correlation between asymmetry measures and medical diagnosis data is investigated. Hardware/software complex developed for solution of the task is described.
Keywords: stereoscopic vision, machine vision, stereoreconstruction, vision pathology diagnosis, face antropometry.
- Bausova Z. I., Bodin O. N., Vostrikov A. A.** The Use of Modelling of Wenckebach's Periodicals for the Estimation of Degree of the Heart Endurance 54
This article is about modelling of conditions for the heart's arrhythmia occurrence. Periods of initial and final time of depolarization and repolarisation procedures for parts of heart's spending system are defined by the results of the analysis of the electrocardiosignal (ECS). With the increase of the loading the PR interval represents the decreasing function of the previous PR interval and this fact considering to the constancy of absolute and relative refractional period in the atrio-ventricular connection is used to define the conditions of the occurrence of arrhythmia by Wenckebach.
Keywords: the analysis of the electrocardiosignal (ECS), Wenckebach's periodicals, the heart endurance.
- Sydorova M. A., Yerushova N. A.** The Choice Substantiation of Parameters Neural Networks Skringing Diagnostics of the Hemostasis System Infringements 59
The disign of skringing system for hemostasis parameters is referred on improvement of quality of diagnostics of clottages and embolisms, and also on preventing of development of serious complications and risk of patients sudden mors. The project includes theoretical research directed on revealing of the most informative parameters with a view of reduction of average value of squares of errors (passings and false operations of a neural network), and as reductions of volumes of calculations. The project also includes practical creation of the modern automated diagnostics systems (skringing systems) which basis is made with neural networks.
Keywords: parameters of the hemostasis, norm, the pathology, ordering, the neural network, skringing system, preliminary diagnostics, training set, control set, correlation, probability.
- Devyatisil'ny A. S., Chislov K. A.** The Model of the Graviinertial System on the Moving Base 67
Within the framework of inertial navigation method the problem of the Earth gravitational field local values estimation is formulated and investigated. This problem is decided in real time mode on the object movement trajectory using Kalman algorithm of dynamical estimation.
Keywords: inertial navigation method, gravimetry, inverse problem.
- Zavedeyev A. I.** Investigation of the Precision of Spacecraft Star Attitude Control System 70
The problem of precision of spacecraft attitude determination in inertial space by star pattern recognition is considered. Perspective directions in development of methods and algorithms of star orientation adapting for onboard computer system are marked. Ways of the decreasing of determining orientation errors for various distribution functions of random errors and star configurations on celestial sphere are proposed.
Keywords: spacecraft, astronomic attitude control system, algorithm, star sensor, measurement error, star pattern recognition.
- Ivchenko N. K., Ivchenko A. V.** Analytical Approach to Problem of Montage Distortion of Speediest Bearing in Gyro-scope 75
The current problem is a key problem for technological task of the montage distortion of speediest bearing and question of stability of accuracy features with its at the creation and perfecting of the precision instruments class. The mathematical tool of the theory of elasticity is applied. Problem is formulated as boundary value problem, for which one the statement is given and method of the solution is determined. Analytical decision allows searching of the constructive decisions, protecting running track of the speediest bearing from montage distortion.
Keywords: speediest bearing, mathematical modeling, boundary value problem of the theory of elasticity, analytical decision, stability of accuracy features, the precision instruments class.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Е. В. Комиссарова.*

Сдано в набор 02.06.2009. Подписано в печать 15.07.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,07. Заказ 604. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15