

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 10 (163)

октябрь

2014

Редакционный совет:

VIDYADHAR S., PhD, prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
JERRY L., PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ШЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮШЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.
ПШИХОПОВ В. Х., д. т. н., проф.
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс., с. н. с.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

ОПТИМИЗАЦИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ

- Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И.** Исследование движения манипуляционных роботов на основе анализа параметров инерции 3
Бобырь М. В., Титов В. С., Милостная Н. А. Прогнозирование работы мехатронных систем на основе мягких нечетких баз знаний. Часть 1 8

МЕХАТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

- Головин В. Ф., Павловский В. Е.** Новые направления в медицинской и сервисной робототехнике: по материалам международной конференции MESROB-2013 15
Воробьев Е. И., Чижиков В. И., Михеев А. В. Разработка моделей и алгоритмов управления подвижными элементами пневматического протеза кисти руки 21
Борисов А. В. Автоматизация проектирования стержневых экзоскелетов 29

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Андреев С. М., Галдин М. С.** Математическая модель теплового режима валковой разливки стали 34
Кулаков С. М., Торопов Д. В. Комплексирование методов математического моделирования химико-технологического процесса в колонне синтеза аммиака 41

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- Новоселов Б. В.** Параметрические и структурные возможности следящих дифференциальных приводов с опорным каналом 46
Насибуллаев И. Ш., Насибуллаева Э. Ш., Денисова Е. В. Влияние различных видов силы трения в системе двух коаксиальных цилиндров 54

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Солдаткин В. В.** Особенности реализации и характеристики системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника 61
Колесниченко С. В. Разработка методологии обоснования требований к точности чувствительных элементов комплексированных систем управления летательных аппаратов 67

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Editorial Council:

ALIEV T. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 ANSHAKOV G. P., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 BIDYADHAR S., PhD, prof.
 BOLOTNIK N. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.
 VASILYEV S.N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.
 JEN-HWA GUO, PhD, prof.
 JERRY L., PhD, prof.
 KALYAEV I. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 KATALINIC B., PhD, prof.
 KRASNEVSKIY L. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 KUZNETSOV N. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 LEONOV G. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.
 MATVEENKO A. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 MIKRIN E. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 PESHEKHONOV V. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 REZCHIKOV A. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 SEBRYAKOV G. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 SIGOV A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.
 SOJFER V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 SOLOVJEV V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 SOLOMENTSEV Yu. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 FEDOROV I. B., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 CHENTSOV A. G., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.
 CHERNOUSKO F. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.
 SCHERBATYUK A. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 YUSUPOV R. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Dr. Sci. (Tech.), prof.

Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 PUTOV V. V., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 YUSCHENKO A. S., Dr. Sci. (Tech.), prof.

Responsible Secretary:

BEZMEANOVA M. Yu.

Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.
 ANTONOV B. I.
 ARSHANSKY M. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 BUKOV V. N., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 VITTIKH V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 GRADETSKY V. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 IVCHENKO V. D., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 ILYASOV B. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 KOLOSOV O. S., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 KOROSTELEV V. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 LEBEDEV G. N., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 LOKHIN V. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 PAVLOVSKY V. E., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.
 PROKHOROV N. L., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 PSHIKHOPOV V. Kh., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 RAPOPORT E. Ya., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 SERGEEV S. F., Dr. Sci. (Psychol.), prof.
 FILARETOV V. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 FRADKOV A. L., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 FURSOV V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
 YUREVICH E. I., Dr. Sci. (Tech.), prof.

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V.

CONTENTS

OPTIMIZATION AND INTELLECTUALIZATION OF CONTROL BY MECHATRONIC SYSTEMS

Krakhmalev O. N., Petreshin D. I. Research of Movement of Manipulative Robots Based on the Analysis of Inertia Parameters 3

Boby'r M. V., Titov V. S., Milostnaya N. A. Prediction of Mechatronic Systems Based on Soft Fuzzy Knowledge Bases. Part 1. 8

MECHATRONICS AND INFORMATION TECHNOLOGIES IN BIOMEDICAL APPLICATIONS

Golovin V. F., Pavlovsky V. E. The New Trends in a Medical and Service Robotics: on Materials of the International MESROB 2013 Conference. 15

Vorob'yov E. I., Chizhikov V. I., Mikheyev A. V. Development of Models and Control Algorithms Mobile Elements of a Pneumatic Actuator Limb of a Hand 21

Borisov A. V. Automation of Designing Core Exoskeletons 29

SIMULATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

Andreev S. M., Galdin M. S. Mathematical Model of Thermal Mode of Twin-Roll Strip Casting 34

Kulakov S. M., Toropov D. V. Integration of methods of mathematical modeling of chemical processes in the column ammonia synthesis 41

ACTUATORS OF MECHATRONIC SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Novosyolov B. V. Parametric and Structural Potential of Differential Servodrives with a Reference Channel 46

Nasibullayev I. Sh., Nasibullaeva E. Sh., Denisova E. V. Influence of different types of friction forces in the two coaxial cylinders. 54

Journal within journal

"CONTROL AND INFORMATICS IN THE AEROSPACE AND MARINE SYSTEMS"

Soldatkin V. V. Features Construction and Characteristics of the System of Air Signals Helicopter's on the Basis of Stationary Multifunctional Aerometric Receiver. 61

Kolesnichenko S. V. To Develop Methods Substantiation of Requirements to Accuracy Sensitive Elements Complexioned Control Systems of High Mobile Objects. 67

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

УДК 621.865.8

О. Н. Крахмалев, канд. техн. наук, доц., olegkr64@mail.ru,
Д. И. Петрешин, д-р техн. наук, зав. каф., atsys@tu-bryansk.ru,
Брянский государственный технический университет

Исследование движения манипуляционных роботов на основе анализа параметров инерции¹

Предложен подход к оптимизации законов движения манипуляционных роботов, основанный на анализе инерционных свойств таких роботов в пространстве их обобщенных координат. При этом задача оптимизации не рассматривается в строгой постановке, так как целевая функция не составляется. Данный подход может быть использован при разработке программного обеспечения систем управления манипуляционными роботами и систем автоматизированного проектирования робототехнологических комплексов.

Ключевые слова: манипуляционные роботы, оптимизация, законы движения, силы инерции.

Введение

Многочисленные исследования показывают, что нагрузка на приводы манипуляционных роботов, используемых в промышленности, определяется главным образом силами инерции. Чем быстрее манипуляционные роботы выполняют транспортные операции, тем выше возникающая при этом инерционная нагрузка. Рассмотрим манипуляционный робот, задача которого состоит в перемещении полезного груза из одной точки его рабочего пространства в другую. Это перемещение может быть выполнено по множеству траекторий, причем прямолинейная траектория не всегда является оптимальной с точки зрения соответствующей этой траектории инертности робота. Поскольку инерционные свойства манипуляционного робота зависят от формы принимаемой им конфигурации, непрерывно меняющейся при его движении, то выбор траекторий, минимизирующих инерционные параметры робота, позволит повысить его быстродействие и грузоподъемность.

1. Постановка задачи исследований

Целью исследований является разработка подхода к оптимизации законов движения манипуляционных роботов, основанного на анализе инерционных свойств таких роботов в пространстве их обобщенных координат. При этом целевая функция (интегральный критерий оптимизации) не составляется, поэтому задача оптимизации не рассматривается в строгой постановке. Данная научная проблема является актуальной и до настоящего времени не решена в объеме, необходимом для решения вы-

текающих из нее технических задач, направленных на повышение быстродействия и снижение энергоемкости процессов манипулирования. Исследования по оптимизации движения манипуляционных роботов проводились и ранее. Например, в статье [1] рассмотрена задача оптимизации, использующая в качестве критерия функционал, содержащий квадратуру линейного ускорения характерной точки рабочего органа манипуляционного робота. В монографии [2] рассмотрена группа критериев качества управления движением. В статье [3] рассмотрено нахождение оптимальной траектории движения для кинематически избыточного манипулятора.

Предлагаемый подход основывается на методе Лагранжа — Эйлера, реализованном с применением аппарата матриц преобразования однородных координат, и методике анализа влияния сил инерции на динамику манипуляционных систем роботов [4]. Такой подход позволил получить аналитические выражения в виде, удобном для использования в системах управления и автоматизированного проектирования. Для исследования динамики манипуляционных систем роботов рассмотрим математическую модель, основанную на матричном уравнении [5]

$$[M]\{\ddot{q}\} + [S]\{\dot{q}^2\} + 2[K]_{i \neq j}\{\dot{q}_i \dot{q}_j\} = \{Q\}, \quad (1)$$

где $\{\ddot{q}\} = [\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_n]^T$ — вектор ускорений обобщенных координат; $\{\dot{q}^2\} = [\dot{q}_1^2, \dot{q}_2^2, \dots, \dot{q}_n^2]^T$ — вектор квадратов скоростей обобщенных координат; $\{\dot{q}_i \dot{q}_j\}_{i \neq j} = [\dot{q}_1 \dot{q}_2, \dot{q}_1 \dot{q}_3, \dots, \dot{q}_1 \dot{q}_n, \dot{q}_2 \dot{q}_3, \dots, \dot{q}_2 \dot{q}_n, \dot{q}_3 \dot{q}_4, \dots, \dot{q}_{n-1} \dot{q}_n]^T$ — вектор попарных произведений обобщенных скоростей, имеющий размерность $C_n^2 \times 1$; n — число степеней свободы манипуляци-

¹ Исследования выполнены при поддержке РФФИ, грант 14-01-00662.

онной системы; C_n^2 — число сочетаний из n по 2; $\{Q\}$ — вектор ($n \times 1$) обобщенных сил [6].

$[M]$ — положительно определенная матрица размерности $n \times n$, отражающая влияние даламберовых сил инерции, действующих на звенья манипуляционной системы робота. Элементы матрицы $[M]$ можно представить суммой:

$$[M] = [m_{ij}], m_{ij} = \sum_{k=1}^n \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_i} H_k \frac{\partial A_{0,k}^T}{\partial q_j} \right), i, j = \overline{1, n}. \quad (2)$$

$[S]$ — матрица размерности $n \times n$, отражающая влияние центробежных сил инерции, действующих на звенья манипуляционной системы робота. Элементы матрицы $[S]$ можно представить суммой:

$$[S] = [s_{ij}], s_{ij} = \sum_{k=1}^n \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_j^2} \right), i, j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

$[K]$ — матрица размерности $n \times C_n^2$, отражающая влияние кориолисовых сил инерции, действующих на звенья манипуляционной системы робота. Элементы матрицы $[K]$ также можно представить суммой:

$$[K] = [k_{ih}], k_{ih} = \sum_{k=2}^n \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_i \partial q_j} \right), \quad i, j = \overline{1, n}, h = \overline{1, C_n^2}, \quad (4)$$

индексы l и t принимают значения порядковых сочетаний из n по 2 для соответствующих им значений индексов h ; H_k — матрица (4×4) инерции k -го звена манипуляционной системы, рассматриваемого как твердое тело; $A_{0,k}$ — матрица (4×4) преобразования однородных координат из системы координат, связанной с k -м звеном, в неподвижную систему координат, связанную с основанием робота.

Элементы матричных коэффициентов $[M]$, $[S]$ и $[K]$ представляют собой параметры инерции манипуляционного робота и являются функциями обобщенных координат, поэтому анализ инерционных свойств манипуляционных роботов в пространстве их обобщенных координат может быть проведен путем анализа ненулевых элементов этих матричных коэффициентов.

По теореме о необходимых условиях экстремума функции многих переменных для элементов матричных коэффициентов m_{ij} , s_{ij} и k_{ih} в точках экстремума $q_i = q_i^*$, $i = (1, \dots, n)$ должны выполняться следующие условия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_{ij}(q_1^*, \dots, q_n^*)}{\partial q_s} = 0, \quad \frac{\partial s_{ij}(q_1^*, \dots, q_n^*)}{\partial q_s} = 0, \\ \frac{\partial k_{ih}(q_1^*, \dots, q_n^*)}{\partial q_s} = 0, \quad s = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (5)$$

Аналитические выражения для частных производных матричных коэффициентов, составляющих уравнения (5), имеют вид:

$$\frac{\partial m_{ij}}{\partial q_s} = \sum_{k=1}^n \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_j \partial q_s} + \frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_j} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_i \partial q_s} \right); \quad (6)$$

$$\frac{\partial s_{ij}}{\partial q_s} = \sum_{k=1}^n \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_i} H_k \frac{\partial^3 A_{0,k}^T}{\partial q_j^2 \partial q_s} + \frac{\partial^2 A_{0,k}}{\partial q_j^2} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_i \partial q_s} \right); \quad (7)$$

$$\frac{\partial k_{ih}}{\partial q_s} = \sum_{k=2}^n \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_i} H_k \frac{\partial^3 A_{0,k}^T}{\partial q_l \partial q_i \partial q_s} + \frac{\partial^2 A_{0,k}}{\partial q_l \partial q_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_j \partial q_s} \right). \quad (8)$$

Для поиска экстремумов могут быть использованы численные методы, например метод Ньютона для безусловной минимизации функции многих переменных. Полагая, что функция $f(x_1, \dots, x_n)$ дважды дифференцируема в некоторой окрестности своего минимума $f_{\min} = f(x_1^*, \dots, x_n^*)$, алгоритм поиска экстремумов на k -м шаге итерации можно представить в виде

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial^2 f(x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})}{\partial x^2} \right] \{\Delta x^{(k)}\} = - \left\{ \frac{\partial f(x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})}{\partial x} \right\}, \\ \{x^{(k+1)}\} = \{x^{(k)}\} + \{\Delta x^{(k)}\}, \end{aligned}$$

где $\{\Delta x^{(k)}\}$ — вектор ($n \times 1$) разности промежуточных решений; $\left[\frac{\partial^2 f(x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})}{\partial x^2} \right]$ — матрица Гессе ($n \times n$); $\left\{ \frac{\partial f(x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})}{\partial x} \right\}$ — градиент ($n \times 1$).

Если матрица Гессе в точке экстремума является положительно определенной, то данная точка соответствует локальному минимуму, если отрицательно определенной — локальному максимуму.

Для составления матрицы Гессе и проверки знакоопределенности этой матрицы в точках экстремума (q_1^*, \dots, q_n^*) используются квадратуры соответствующих функций m_{ij} , s_{ij} и k_{ih} , $i, j = \overline{1, n}$, $h = \overline{1, C_n^2}$, которые могут быть получены из выражений (6)–(8). В нашем случае будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 m_{ij}(q_1, \dots, q_n)}{\partial q_p \partial q_q} = \\ = \sum_{k=1}^n \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_i} H_k \frac{\partial^3 A_{0,k}^T}{\partial q_j \partial q_p \partial q_q} + \frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_j} H_k \frac{\partial^3 A_{0,k}^T}{\partial q_i \partial q_p \partial q_q} + \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 A_{0,k}}{\partial q_i \partial q_p} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_j \partial q_q} + \frac{\partial^2 A_{0,k}}{\partial q_i \partial q_q} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_j \partial q_p} \right); \quad (9) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 s_{ij}(q_1, \dots, q_n)}{\partial q_p \partial q_q} = \sum_{k=1}^n \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k} H_k}{\partial q_i} \frac{\partial^4 A_{0,k}^T}{\partial q_j^2 \partial q_p \partial q_q} + \frac{\partial^2 A_{0,k} H_k}{\partial q_j^2} \frac{\partial^3 A_{0,k}^T}{\partial q_i \partial q_p \partial q_q} + \frac{\partial^2 A_{0,k} H_k}{\partial q_i \partial q_p} \frac{\partial^3 A_{0,k}^T}{\partial q_j^2 \partial q_q} + \frac{\partial^2 A_{0,k} H_k}{\partial q_i \partial q_q} \frac{\partial^3 A_{0,k}^T}{\partial q_j^2 \partial q_p} \right); \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 k_{ih}(q_1, \dots, q_n)}{\partial q_p \partial q_q} = \sum_{k=2}^n \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k} H_k}{\partial q_i} \frac{\partial^4 A_{0,k}^T}{\partial q_l \partial q_l \partial q_p \partial q_q} + \frac{\partial^2 A_{0,k} H_k}{\partial q_l \partial q_l} \frac{\partial^3 A_{0,k}^T}{\partial q_i \partial q_p \partial q_q} + \frac{\partial^2 A_{0,k} H_k}{\partial q_i \partial q_p} \frac{\partial^3 A_{0,k}^T}{\partial q_l \partial q_l \partial q_q} + \frac{\partial^2 A_{0,k} H_k}{\partial q_i \partial q_q} \frac{\partial^3 A_{0,k}^T}{\partial q_l \partial q_l \partial q_p} \right). \quad (11)$$

Для исследования движения робота в его рабочей зоне, построенной в пространстве обобщенных координат, удобно использовать не экстремумы функций $m_{ij}(q_1, \dots, q_n)$, $s_{ij}(q_1, \dots, q_n)$ и $k_{ih}(q_1, \dots, q_n)$, а экстремумы их модулей. Связь между экстремумами этих функций и экстремумами их модулей может быть однозначно определена по следующему правилу:

пусть $u = (m_{ij}, s_{ij}, k_{ih})$, $v = (|m_{ij}|, |s_{ij}|, |k_{ih}|)$, тогда

$$\text{if_max}(u) > 0 _and _min(u) > 0 _then _max(v) = \max(u),$$

$$_min(v) = \min(u);$$

$$\text{if_max}(u) > 0 _and _min(u) < 0 _then _max(v) = \max(\max(u), |\min(u)|),$$

$$_min(v) = 0;$$

$$\text{if_max}(u) < 0 _and _min(u) < 0 _then _max(v) = \min(u),$$

$$_min(v) = \max(v).$$

В пространстве обобщенных координат на основе точек, соответствующих экстремумам (минимумам) модулей ненулевых элементов матричных коэффициентов динамической модели (1), определяется область рабочей зоны манипуляционного робота, внутри которой выбирается траектория его движения. Построенная таким образом траектория движения может считаться оптимальной с точки зрения влияния инерционных параметров, определяемых матричными коэффициентами (2)—(4).

2. Метод оптимизации

Предлагаемый метод оптимизации движения манипуляционных роботов на основе анализа параметров инерции может быть представлен следующей последовательностью действий:

1. Формируется математическая модель манипуляционной системы робота на основе уравнений (1)—(4) [5].

2. Определяются экстремумы ненулевых элементов матричных коэффициентов сформирован-

ной математической модели манипуляционного робота на основе условий (5)—(11) [4].

3. В пространстве обобщенных координат на основе точек, соответствующих экстремумам (минимумам) модулей ненулевых элементов матричных коэффициентов модели робота, определяется область его рабочей зоны, внутри которой выбирается траектория его движения. Данная траектория движения может считаться оптимальной с точки зрения влияния инерционных параметров, определяемых матричными коэффициентами (2)—(4).

4. На основе заданных пространственно-временных условий определяется закон движения робота по траектории, выбранной на предыдущем этапе.

5. При необходимости путем решения прямой задачи кинематики найденные оптимальные траектории движения могут быть построены в прямоугольной системе координат.

Предложенный метод оптимизации позволяет эффективно выбирать конструкции манипуляционных роботов и планировать траектории их движения при проектировании робототехнологических комплексов [7—9].

Проиллюстрируем применение рассмотренного метода оптимизации на примере исследования трехзвенного манипуляционного робота, кинематическая схема манипуляционной системы которого представлена на рис. 1.

Первое звено исследуемой манипуляционной системы вращается вокруг вертикальной оси, имеет массу $m_1 = 3$ кг и моделируется тонкостенным цилиндром длиной $l_1 = 1$ м и радиусом $R_1 = 0,01$ м. Второе звено, имеющее массу $m_2 = 3$ кг, совершает поступательные перемещения вдоль горизонтальной оси и моделируется стержнем длиной $2l_2 = 1$ м. Третье звено представляет собой сосредоточенную

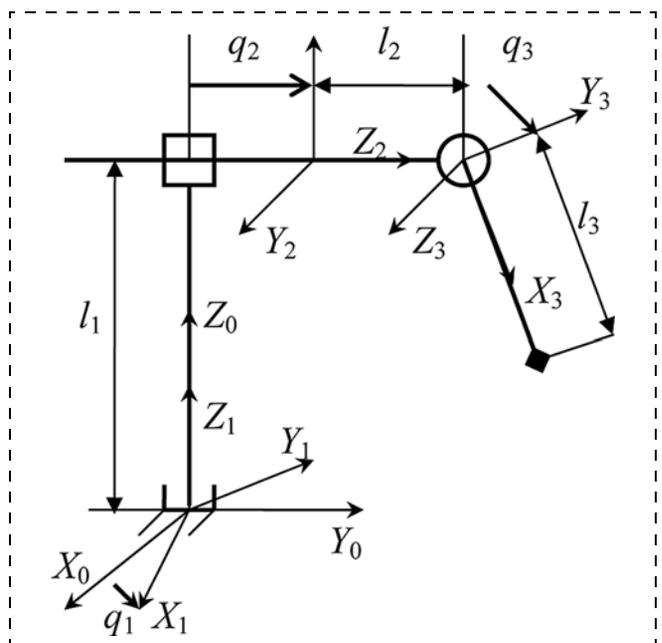


Рис. 1. Кинематическая схема

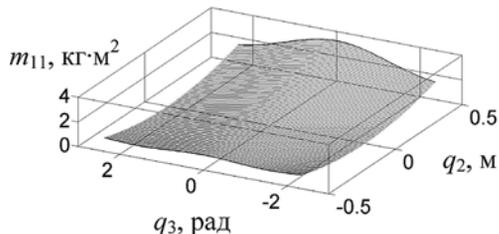


Рис. 2. Поверхность $m_{11}(q_2, q_3)$

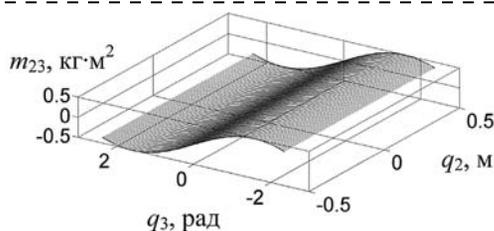


Рис. 3. Поверхность $m_{23}(q_2, q_3)$

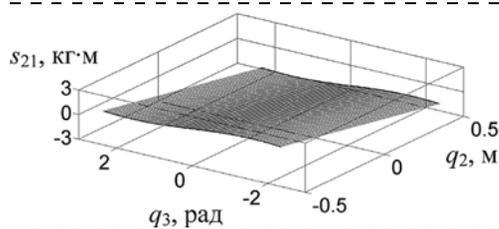


Рис. 4. Поверхность $s_{21}(q_2, q_3)$

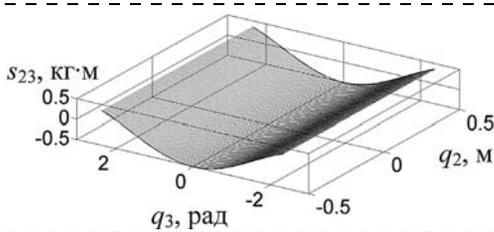


Рис. 5. Поверхность $s_{23}(q_2, q_3)$

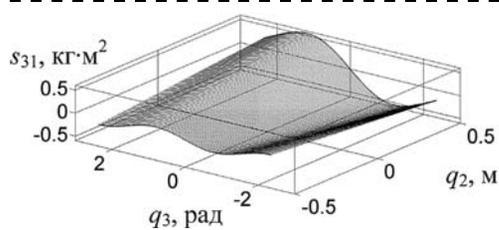


Рис. 6. Поверхность $s_{31}(q_2, q_3)$

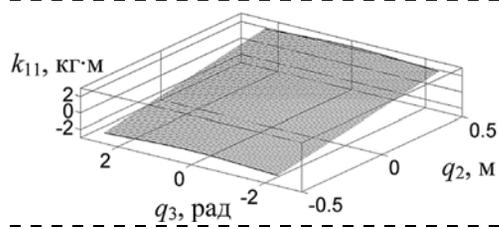


Рис. 7. Поверхность $k_{11}(q_2, q_3)$

массу $m_3 = 1$ кг и совершает вращательное движение в вертикальной плоскости, совпадающей со вторым звеном. Используя кинематическую схему манипуляционной системы, составим матрицы $A_{0,k}$, описывающие ее конфигурацию, и матрицы H_k , описывающие распределение масс в звеньях этой манипуляционной системы ($k = 1, 2, 3$) [5].

На основе уравнения (1) построим математическую модель трехзвенной манипуляционной системы, которая будет иметь вид матричного уравнения:

$$[M][\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \ddot{q}_3]^T + [S][\dot{q}_1^2, \dot{q}_2^2, \dot{q}_3^2]^T + 2[K][\dot{q}_1 \dot{q}_2, \dot{q}_1 \dot{q}_3, \dot{q}_2 \dot{q}_3]^T = \{Q_D\} + \{Q_G\}, \quad (12)$$

$\{Q_D\}$ — вектор (3×1) усилий, развиваемых приводами; $\{Q_G\}$ — вектор (3×1) обобщенных сил, соответствующих силам тяжести звеньев исследуемой манипуляционной системы и перемещаемого груза [6].

Матричные коэффициенты $[M]$, $[S]$ и $[K]$, входящие в уравнение (12), для выбранной модели манипуляционной системы можно представить в развернутом (поэлементном) виде:

$$[m_{ij}] = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}; [s_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ s_{21} & 0 & s_{23} \\ s_{31} & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[k_{ih}] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Ненулевые элементы матричных коэффициентов (13) могут быть получены в общем виде, например:

$$m_{11} = m_1 R_1^2 + m_2 \left(\frac{1}{3} l_2^2 + q_2^2 \right) + m_3 (q_2 + l_2 + l_3 \cos q_3)^2,$$

где первое слагаемое — это момент инерции тонкостенного цилиндра с массой m_1 и радиусом R_1 относительно оси вращения первого звена, второе слагаемое — момент инерции второго звена, моделируемого стержнем длиной $2l_2$ и массой m_2 , относительно оси вращения первого звена, третье слагаемое — момент инерции третьего звена (сосредоточенная масса m_3) относительно оси вращения первого звена. Аналогично могут быть получены выражения для других ненулевых элементов:

$$m_{22} = m_2 + m_3, \quad m_{23} = m_{32} = -m_3 l_3 \sin q_3, \quad m_{33} = m_3 l_3^2;$$

$$s_{21} = -m_2 q_2 - m_3 (q_2 + l_2 + l_3 \sin q_3), \quad s_{23} = -m_3 l_3 \cos q_3,$$

$$s_{31} = m_3 l_3 (q_2 + l_2 + l_3 \cos q_3) \sin q_3;$$

$$k_{11} = m_2 q_2 + m_3 l_3 (q_2 + l_2 + l_3 \cos q_3),$$

$$k_{12} = -m_3 l_3 (q_2 + l_2 + l_3 \cos q_3) \sin q_3.$$

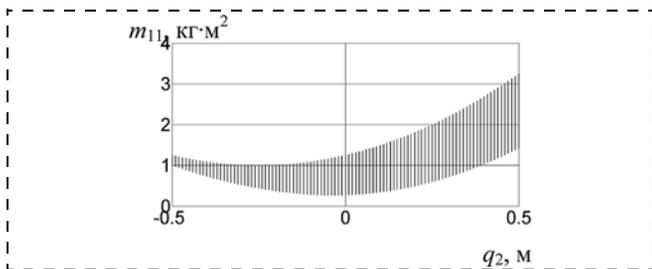


Рис. 8. Проекция поверхности $m_{11}(q_2, q_3)$ на плоскость (m_{11}, q_2)

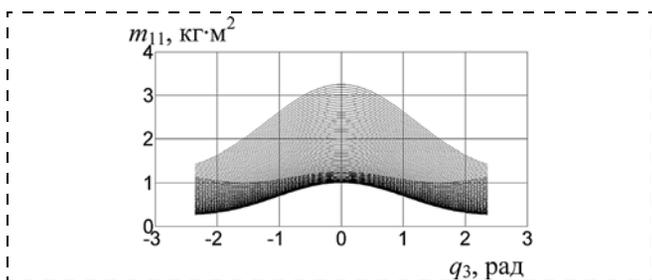


Рис. 9. Проекция поверхности $m_{11}(q_2, q_3)$ на плоскость (m_{11}, q_3)

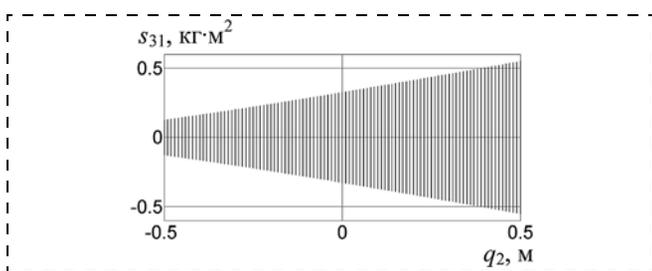


Рис. 10. Проекция поверхности $s_{31}(q_2, q_3)$ на плоскость (s_{31}, q_2)

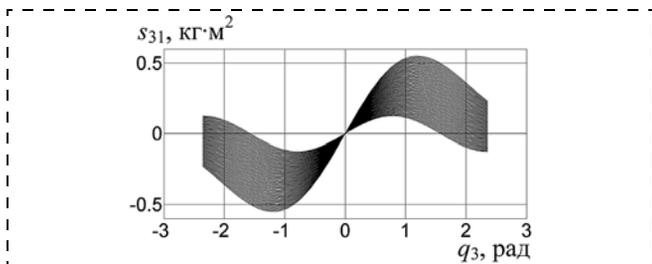


Рис. 11. Проекция поверхности $s_{31}(q_2, q_3)$ на плоскость (s_{31}, q_3)

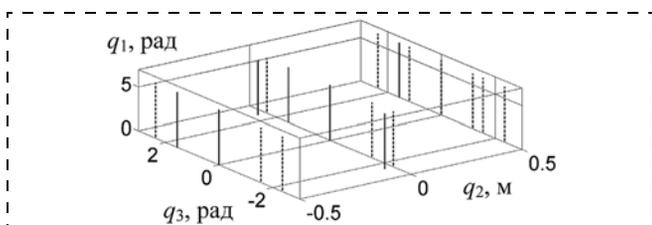


Рис. 12. Экстремумы ненулевых элементов

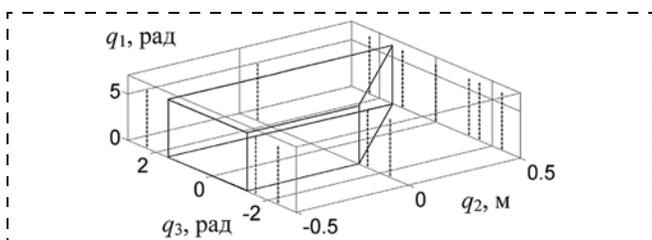


Рис. 13. Область оптимальных траекторий

Полученные зависимости могут быть представлены графически в виде соответствующих им поверхностей, изображенных внутри рабочей зоны робота: $0 \leq q_1 \leq 2\pi$; $-l_2 \leq q_2 \leq l_2$; $-3\pi/4 \leq q_3 \leq 3\pi/4$.

На рис. 2—7 представлены поверхности, соответствующие зависимостям $m_{11}(q_2, q_3)$, $m_{23}(q_2, q_3)$, $s_{21}(q_2, q_3)$, $s_{23}(q_2, q_3)$, $s_{31}(q_2, q_3)$, $k_{11}(q_2, q_3)$, а на рис. 8—11 — проекции поверхностей $m_{11}(q_2, q_3)$ и $s_{31}(q_2, q_3)$ на плоскости: (m_{11}, q_2) , (m_{11}, q_3) и (s_{31}, q_2) , (s_{31}, q_3) соответственно.

Экстремумы модулей исследуемых зависимостей ненулевых элементов $m_{ij}(q_2, q_3)$, $s_{ij}(q_2, q_3)$ и $k_{ih}(q_2, q_3)$ ($i, j, h = 1, 2, 3$) могут быть представлены графически (рис. 12). Штриховыми линиями изображены максимумы исследуемых зависимостей, а сплошными линиями — минимумы, не совпадающие с максимумами. Область оптимальных траекторий, полученная объединением областей рабочей зоны робота, соответствующих минимумам исследуемых ненулевых элементов, представлена на рис. 13.

Законы движения, необходимые для управления рассматриваемым манипуляционным роботом, могут быть получены на основе выбранных траекторий движения внутри построенной оптимальной области рабочей зоны робота и заданных пространственно-временных условий.

Список литературы

1. **Зенкевич С. Л., Назарова А. В.** О максимальных ускорениях схвата манипулятора // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 6 (6). С. 44—49.
2. **Козлов В. В., Макарычев В. П., Тимофеев А. В., Юревич Е. И.** Динамика управления роботами. М.: Наука, 1984. 336 с.
3. **Гриценко П. А., Арановский С. В.** Нахождение оптимальной траектории движения по заданному пути для кинематически избыточного манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 40—44.
4. **Крахмалев О. Н.** Методика анализа влияния сил инерции на динамику манипуляционных роботов // Теория механизмов и машин. 2012. № 20. Т. 10. С. 41—53.
5. **Крахмалев О. Н.** Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов: монография. Брянск: БГТУ, 2012. 200 с.
6. **Крахмалев О. Н., Болдырев А. П.** Моделирование обобщенных сил, действующих на звенья манипуляционных систем // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. № 1. С. 115—121.
7. **Крахмалев О. Н., Медведев Д. М., Петрешин Д. И.** Оптимизация законов движения при моделировании динамики манипуляционных роботов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 1. С. 27—30.
8. **Федонин О. Н., Петрешин Д. И., Хандожко А. В., Агеев А. В.** Учет погрешностей системы управления в балансе точности токарного станка с ЧПУ // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 3. С. 55—57.
9. **Финатов Д. Н., Петрешин Д. И., Горячев Г. В.** Механосборочный робототехнологический комплекс // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2003. № 1. С. 4—6.

Research of Movement of Manipulative Robots Based on the Analysis of Inertia Parameters

An approach to the optimization of the laws of motion manipulation robots based on an analysis of inertial parameters of robots in the space of generalized coordinates. This approach is original. In this case the objective function is not made, so the task of optimization not being examined a rigorous formulation. The proposed approach is based on a previously developed technique. This approach can be used to develop software systems management manipulation robots and systems computer-aided design robotized complexes. This approach was used to develop a method for optimizing the laws of motions manipulation robots. Optimization method is described in detail. In this paper we have an example illustrating the use of this method. In the example used robot with three degrees of freedom. Example illustrated graphics. Are available references to the literature used. The article may be of interest to specialists on the dynamics of robots.

Keywords: manipulation robots, optimization of motion, inertial forces

References

1. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V.** O maksimal'nykh uskorenyakh skhvata manipulyatora. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2012. N. 6 (6). P. 44–49.
2. **Kozlov V. V., Makarychev V. P., Timofeev A. V., Yurevich E. I.** Dinamika upravleniya robotami. M.: Nauka, 1984. 336 p.
3. **Gritsenko P. A., Aranovskiy S. V.** Nakhozhdenie optimal'noy traektorii dvizheniya po zadannomu puti dlya kinematischezki izbytochnogo manipulyatora. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2014. N. 1. P. 40–44.
4. **Krakhmalev O. N.** Metodika analiza vliyaniya sil inertsii na dinamiku manipulyatsionnykh robotov. *Teoriya mekhanizmov i mashin*. 2012. N. 20. Iss. 10. P. 41–53.
5. **Krakhmalev O. N.** Matematicheskoe modelirovanie dinamiki manipulyatsionnykh sistem promyshlennykh robotov i kranov-manipulyatorov: monografiya. Bryansk: BGTU, 2012. 200 p.
6. **Krakhmalev O. N., Boldyrev A. P.** Modelirovanie obobshchennykh sil, deystvuyushchikh na zven'ya manipulyatsionnykh sistem. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. N. 1. P. 115–121.
7. **Krakhmalev O. N., Medvedev D. M., Petreshin D. I.** Optimizatsiya zakonov dvizheniya pri modelirovanii dinamiki manipulyatsionnykh robotov. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. N. 1. P. 27–30.
8. **Fedonin O. N., Petreshin D. I., Khandozhko A. V., Ageenko A. V.** Uchet pogreshnostey sistema upravleniya v balanse tochnosti tokarnogo stanka s ChPU. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013. N. 3. P. 55–57.
9. **Finatov D. N., Petreshin D. I., Goryachev G. V.** Mekhanosborochnyy robototekhnologicheskii kompleks. *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*. 2003. N. 1. P. 4–6.

УДК 681.518; 004.896

М. В. Бобырь, д-р техн. наук, доц., fregat_mn@rambler.ru, **В. С. Титов**, д-р техн. наук, проф.,
Н. А. Милостная, канд. техн. наук, преподаватель, nat_mil@mail.ru,
Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Прогнозирование работы мехатронных систем на основе мягких нечетких баз знаний. Часть 1*

Предлагается метод прогнозирования сложных процессов, протекающих в мехатронных системах, на основе мягких нечетких баз знаний, синтезированных с помощью модифицированного алгоритма нечетко-логического вывода. Рассмотренные примеры показывают эффективность мягких вычислений по сравнению с жесткими.

Ключевые слова: нечетко-логический вывод, нечеткая база знаний, адаптация, прогнозирование, мягкие вычисления, модифицированный алгоритм нечетко-логического вывода, аддитивность

Введение

При прогнозировании процессов, протекающих в мехатронных системах, возникает необходимость учета в режиме реального времени внешних воздействий на систему. Традиционным подходом к анализу подобных многофакторных систем являются регрессионные модели [1–3]. Многомерные

зависимости, характеризующие показатели качества мехатронных систем, учитываются на основе корреляционно-регрессионных моделей, причем многофакторные модели описываются только линейными зависимостями, что является существенным ограничением регрессионных моделей для анализа нелинейных систем.

Увеличение производительности подобных систем возможно за счет внедрения в них экспертных знаний о возможности моделирования и/или прогнозирования взаимосвязи между внешними факто-

* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках гранта Президента РФ НШ-2357.2014.8.

рами, действующими на мехатронную систему, и количественными показателями, оценивающими эффективность ее работы. В теории нечеткой логики экспертные знания, как правило, формируются на основе лингвистических правил типа "Если ... то ...". Далее экспертные оценки преобразуются в математические модели на основе традиционных нечетко-логических алгоритмов, к которым относятся модели Мамдани и Такаги—Сугэно [4—10]. Общей особенностью в указанных работах является построение нечетких баз знаний на основе совокупности жестких нечетких правил управления [11], при использовании которых невозможно обеспечить аддитивность мехатронной системы, под которой понимается отсутствие реакции на выходе системы при изменении входных параметров [12].

В данной статье предлагается описывать сложные мехатронные системы (MISO-системы) принципиально новым классом математических моделей, основанных на нечетких базах знаний, основой которых является модифицированный алгоритм нечетко-логического вывода [13, 14]. При этом использование мягких арифметических операций в структуре нечетко-логического вывода позволяет обеспечить соблюдение условия аддитивности системы управления [15].

Статья разбита на две части и организована следующим образом. В первой части описывается синтез мягкой нечеткой базы знаний и представлен метод ее заполнения с поясняющими примерами. Приведены алгоритм функционирования и описано численное моделирование управления мехатронной системы с помощью жестких и мягких баз знаний. Во второй части статьи рассмотрены вопросы, связанные с обучением нечеткой базы знаний по выборке, полученной на основе линейной регрессионной модели. Кроме того, проведен анализ обучения жестких и мягких нечетких баз знаний на основе среднеквадратического отклонения.

Синтез мягкой нечеткой базы знаний

Большинство знаний эксперта о предметной области в некоторых случаях невозможно описать с помощью количественной оценки, используя традиционные стохастические или детерминированные методы представления знаний. Для формализации знаний такого рода Л. Заде предложил использовать аппарат нечеткой логики, способный представить познания эксперта в определенной научно-технической области знаний.

Пусть $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ — множество факторов, влияющих на качество функционирования мехатронной системы, а Y — прогнозируемый показатель системы. Тогда формализация решения поставленной задачи на основе мягкой нечеткой базы знаний сводится к поиску отображения вида $X \rightarrow Y$.

Нечеткой базой знаний называется совокупность нечетких правил (НП) вида "Если — То", определяющих взаимосвязь между входами и выходами

контролируемого объекта и/или экспертной системы [16]:

$$\text{НП}_{1\dots n}: \text{Если } "a_1 \text{ есть } a_{1n}" \phi "a_2 \text{ есть } a_{2n}" \phi \dots \phi "a_n \text{ есть } a_{mn}" \text{ То } "y \text{ есть } y_n", \quad (1)$$

где n — число нечетких правил; m — число входных переменных; ϕ — знак нечетко-логической операции (минимум либо максимум); " a_n есть a_{mn} " — нечеткая предпосылка; " y есть y_n " — нечеткое заключение.

Если НП содержат только одну логическую операцию И либо ИЛИ, то нечеткую базу знаний удобно представить в виде табл. 1.

При этом термины входных и выходных лингвистических переменных мехатронной системы представим в виде параметризованных функций принадлежности (ФП) [17]

$$a_{mn} = \left\{ u_{11} \int_a^b \left(\frac{x'_i - a}{b - a} \right) / x_1 + u_{12} \int_b^c \left(\frac{c - x'_i}{c - b} \right) / x_1 \right\} + \left\{ u_{21} \int_b^c \left(\frac{x'_i - b}{c - b} \right) / x_2 + u_{22} \int_c^d \left(\frac{d - x'_i}{d - c} \right) / x_2 \right\}, \quad (2)$$

где a, b, c, d — параметры треугольной функции принадлежности; $+$ и \int — знаки, согласно Заде, операции объединения предпосылок НП и суппорта термов ФП, соответственно; x'_i — количественные значения (ось абсцисс) лингвистических переменных системы; $u_{11}, u_{12}, u_{21}, u_{22}$ — логические переменные, определяемые как

$$u_{11} = \begin{cases} 1 & \text{для } a < x \leq b, \\ 0 & \text{в других случаях;} \end{cases} u_{21} = \begin{cases} 1 & \text{для } b < x \leq c, \\ 0 & \text{в других случаях;} \end{cases} \\ u_{12} = \begin{cases} 1 & \text{для } b < x \leq c, \\ 0 & \text{в других случаях;} \end{cases} u_{22} = \begin{cases} 1 & \text{для } c < x \leq d, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (3)$$

После формализации представления лингвистических переменных мехатронной системы необходимо реализовать процедуру нечетко-логического вывода, которая заключается в следующей последовательности действий.

Степени истинности входного вектора X к заключениям НП рассчитываются по формуле определения жесткого минимума [18]:

$$\mu(y_n) = \wedge [\mu(a_{mn})]. \quad (4)$$

Недостаток традиционного подхода к определению степени истинности для заключений на основе жестких формул заключается в том, что у мехатронной системы не обеспечивается наличие свойства аддитивности, под которым понимается отсутствие реакции на выходе при изменении входных переменных [15]. Например, при реализации операции нахождения жесткого минимума из двух операндов $[a_1; a_2] = [0; 0,7] = 0$ ответ не будет изменяться, если значение первой переменной не превысит значение 0,7, т. е. система не реагирует

на изменение входного параметра в интервале значений $a_1 = [0; 0,7]$.

В целях устранения данного недостатка авторы предлагают использовать для нахождения минимума мягкие арифметические операции. Так, для расчета мягкого минимума удобно применять следующую формулу:

$$\min_{\delta}(a_1, a_2) = \frac{a_1 + a_2 + \delta^2 - \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + \delta^2}}{2},$$

где $\delta = 0,05$. (5)

Так, $\min_{\delta}(0,7; 0) = \frac{0,7 + 0 + 0,05^2 - \sqrt{(0,7 - 0)^2 + 0,05^2}}{2} = 0,0076$. Следовательно, мехатронная система на выходе будет давать значение, отличное от нуля, и обладать свойством аддитивности.

Формула взятия параметризованного мягкого максимума:

$$\max_{\delta}(a_1, a_2) = |\gamma \max(a_1, a_2) + 0,5(1 - \gamma)(a_1 + a_2)|,$$

где $\forall a_1 \in A_1, \forall a_2 \in A_2$, (6)

γ — оператор параметризации.

При $\gamma = 1$ формула (6) сводится к операции "жесткого" максимума MAX, при $\gamma = 0$ формула (6) сводится к операции среднего арифметического (MEAN).

Преобразуем формулу (4) к виду

$$\mu(\beta_n) = \min_{\delta}[\mu(a_{mn})].$$
 (7)

После расчета всех степеней истинности для каждого НП (1) базы знаний необходимо выполнить дефазификацию выходного значения, используя метод центра тяжести, по формуле

$$y_d = \frac{y_1\mu(y_1) + y_2\mu(y_2) + \dots + y_n\mu(y_n)}{\mu(y_1) + \mu(y_2) + \dots + \mu(y_n)} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i\mu(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)}. (8)$$

Для учета различной адекватности суждений эксперта в правильности каждого НП используется весовой коэффициент f , который назначается из интервала $[0, 1]$; если в обозначении НП его нет, то $f = 1$. С учетом весового коэффициента и мягких

арифметических операций нечеткая база знаний ψ на основе нечетких правил (табл. 1) запишется как

$$\psi = \max_{\delta} \left(\max_{\delta} a_n = a_{mn} \text{ с весом } f \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow y_d = \frac{\sum_{i=1}^n y_n \mu(y_n)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_n)}. (9)$$

Ниже рассмотрим методику заполнения мягкой нечеткой базы знаний на основе представленных выше формул (1)–(9).

Метод заполнения мягкой нечеткой базы знаний

Пусть на входе системы действуют два входных (a_1 и a_2) и один выходной сигнал y . Необходимо сформировать базу знаний таким образом, чтобы мехатронная система в зависимости от поступления на ее вход сигналов формировала выходной сигнал для передачи его на исполнительные механизмы [19].

Шаг 1. Построение функций принадлежности.

На этом этапе необходимо определить диапазон допустимых значений для входных переменных $a_1 = [a_{1n\min}, a_{1n\max}]$ и $a_2 = [a_{2n\min}, a_{2n\max}]$ и выходной переменной $y = [y_{n\min}, y_{n\max}]$. У входных сигналов диапазон разбивается на три терма $a_1 = \{a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$ и $a_2 = \{a_{21}, a_{22}, a_{23}\}$, а выходная переменная имеет пять термов $y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5\}$. Воспользуемся параметризованным методом построения ФП с помощью формул (2)–(3), тогда ФП будут иметь треугольный вид (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

С учетом рис. 1 определим: $a_1 = [10, 90]$, $a_2 = [205, 285]$, $y = [405, 495]$.

Шаг 2. Разработка нечетких правил управления.

С учетом рекомендаций работы [12], чтобы база знаний была полной, необходимо, чтобы в ней содержалось 15 нечетких правил (заключений): $x = w^z + wz = 3^2 + 3 \cdot 2 = 15$, где x — число заключений; w — число термов y входных переменных; z — число входных переменных. На основе формулы (1) построим систему нечетких правил и сведем ее в табл. 2.

Далее необходимо рассчитать степени принадлежности входных переменных. Например, для параметра $a_1 = 20$ степень принадлежности к терму a_{11}

Таблица 1

Представление нечеткой базы знаний

Если				То
a_1	a_2	...	a_n	y
a_{11}	a_{21}	...	a_{m1}	y_1
a_{12}	a_{22}	...	a_{m2}	y_2
...
a_{1n}	a_{2n}	...	a_{mn}	y_n

Таблица 2

Система нечетких правил управления

НП	Если	То	НП	Если	То	НП	Если	То			
НП ₁	a_{11}	a_{21}	y_5	НП ₄	a_{12}	a_{21}	y_4	НП ₇	a_{13}	a_{21}	y_3
НП ₂	a_{11}	a_{22}	y_4	НП ₅	a_{12}	a_{22}	y_3	НП ₈	a_{13}	a_{22}	y_2
НП ₃	a_{11}	a_{23}	y_3	НП ₆	a_{12}	a_{23}	y_2	НП ₉	a_{13}	a_{23}	y_1
НП ₁₀	a_{11}	y_5	a_{13}	НП ₁₂	a_{13}	y_2	a_{22}	НП ₁₄	a_{22}	y_3	y_3
НП ₁₁	a_{12}	y_3	a_{21}	НП ₁₃	a_{21}	y_4	a_{23}	НП ₁₅	a_{23}	y_1	y_1

равна 0,75, а терму a_{12} равна 0,25, а для параметра $a_2 = 258$ степень принадлежности к терму a_{22} равна 0,35, а терму a_{23} равна 0,65, соответственно. Для остальных термов степени принадлежности параметров равны 0.

Используя операцию нечеткого минимума (И), для каждой пары обучаемой выборки рассчитываем уровень отсечения выходного термина:

НП₂: Если (a_1 есть a_{11}) И (a_2 есть a_{22}) То (y есть y_4) $\Rightarrow y_6 \rightarrow \langle a_{11} \wedge a_{22} \rangle = \langle 0,75 \wedge 0,35 \rangle = 0,35$.

Шаг 3. Расчет для каждого правила управления степени принадлежности. В работе [20] показано, что при составлении обучающих пар для каждой из них может быть получено только одно НП, следовательно, существует высокая вероятность того, что некоторые правила окажутся противоречивыми друг другу. Предложено для каждого НП находить степень принадлежности с последующим выбором из них наибольшего значения. Необходимо отметить, что данное замечание справедливо только для случаев, когда термы входных и выходных переменных имеют трапециевидную форму, где интервал ядра нечеткого интервала равняется 1. Для остальных видов параметризованных методов назначения ФП ясно, что максимальное значение степеней истинности всегда будет в вершинах треугольников либо максимумов других функций, описывающих каждый из термов, тогда нечеткая логика превращается в четкую логику, и физический смысл описания неопределенных или нечетко заданных входных и/или выходных данных теряется. Для устранения этой проблемы авторы предлагают использовать k -слойную матрицу, способную отображать значения истинности для каждого НП. Степени принадлежности θ для каждого из НП определяются по формуле

$$\theta_n = \mu(a_1)_k \mu(a_2)_k \mu(y)_k, \quad (10)$$

где $\mu(y)_k = \vee \{ \mu(a_1)_k; \mu(a_2)_k \}$; k — число слоев матрицы, которое равно максимальному значению из всех носителей нечеткого интервала для каждой из входных переменных и определяется по формуле

$$k = \bigvee^n (a_{ic} - a_{ia}). \quad (11)$$

Например,

$$k = \max \{ (a_{1c} - a_{1a}); (a_{1d} - a_{1b}); (a_{1e} - a_{1c}); (a_{2c} - a_{2a}); (a_{2d} - a_{2b}); (a_{2e} - a_{2c}) \} = \\ = \{ (35 - 10); (70 - 15); (90 - 35); (245 - 205); (265 - 235); (285 - 245) \} = \{ 25; 55; 55; 40; 30; 40 \} = 55.$$

Из рис. 1, а (см. вторую сторону обложки) видно, что максимальное значение k у термов $a_{12} = a_{13} = 55$. Таким образом, число слоев матрицы k -слойной матрицы будет равно 55.

Вычислим по формуле (10) значения степеней истинности для вышеуказанного правила:

$$\theta_2 = \mu(a_{11})\mu(a_{22})\mu(y_{41}) = \\ = 0,75 \cdot 0,35 \vee (0,75; 0,35) = 0,197.$$

Также на четвертый терм выходной переменной, согласно табл. 2, ссылаются правила с номерами 4 и 13. Так, для четвертого и тринадцатого правил степени истинности равны:

$$\theta_4 = \mu(a_{12})\mu(a_{21})\mu(y_{42}) = 0,25 \cdot 0 \vee (0,25; 0) = 0;$$

$$\theta_{13} = \mu(a_{21})\mu(y_{43}) = 0 \cdot 0 = 0.$$

Шаг 4. Дефаззификация управляющего решения. Необходимо рассчитать управляющее значение, которое формируется на выходе мехатронной системы. Для этой операции воспользуемся методом центра тяжести по формуле (9).

Проведем дефаззификацию управляющего решения для случая, когда $a_1 = 20$ и $a_2 = 258$ (рис. 1, а, см. вторую сторону обложки):

тогда $a_{11} = 0,75$ и $a_{12} = 0,35$; $a_{22} = 0,35$ и $a_{23} = 0,65$.

С учетом формул (1)—(9) проведем расчет управляющего решения с учетом жестких и мягких арифметических операций:

- жесткие формулы: $y_{дж} = 449,31$;
- мягкие формулы $y_{дм} = 450,77$.

Шаг 5. Создание k -слойной матрицы для мягкой базы знаний. Один из слоев k -слойной матрицы базы знаний показан на примере табл. 3, в которой на пересечении столбцов и строк, определяющих термы входных переменных $a_1 = \{a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$ и $a_2 = \{a_{21}, a_{22}, a_{23}\}$, заносятся значения одного из выходного термина $y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5\}$ и значение степени принадлежности, определенной по формуле (10). Так, например, на пересечении a_{11} и a_{22} заносятся значения выходного термина y_4 и степени принадлежности, равной 0,197.

Матрица, приведенная в табл. 3, будет иметь размерность $n \times m \times k$ ($3 \times 3 \times 55$ — столбец \times строка \times слой).

С учетом k -слойной структуры формула, описывающая нечеткую базу знаний (9), преобразуется к виду

$$\psi = \max_{\delta}^k \left(\max_{\delta}^n \left(\min_{\delta}^m a_n = a_{mn} \text{ с весом } f \right) \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow y_d = \frac{\sum_{i=1}^n y_n \mu(y_n)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_n)}. \quad (12)$$

Таблица 3

K-слойная матрица

		Если			То
		a_1			
a_2		a_{11}	a_{12}	a_{13}	y_4
	a_{21}				
a_{22}	$\min_{\delta} (0,75; 0,35) = 0,349$				450,77 (0,197)
a_{23}					

Алгоритм функционирования нечеткой базы знаний

Алгоритм (рис. 2) синтезирован на основе формул (1)–(9), (12) и последовательного выполнения пяти шагов, рассмотренных выше. Последовательность шагов, которые необходимо реализовать для его выполнения, следующая:

1. Сформировать параметризованные ФП термов для входных переменных и выходных переменных по формулам (2)–(3).
2. На основе формулы (1) разработать систему нечетких правил управления.
3. По формуле (10) рассчитать степени принадлежности для каждого НП управления и затем по формуле (11) определить число слоев матрицы, необходимых для ее заполнения.
4. С использованием формулы (9) провести дефаззификацию управляющего решения мехатронной системой.
5. Используя формулу (12), создать k -слойную матрицу для заполнения нечеткой базы знаний.

Моделирование заполнения нечеткой базы знаний на основе мягких и жестких вычислений

При использовании жестких арифметических операций чувствительность мехатронной системы резко снижается, при этом жесткая система не обладает аддитивностью, под которой понимается отсутствие выходной реакции на изменение входных параметров. Это связано с тем, что для рассматриваемого в статье примера в случае, когда $a_1 \in [0; 10] \cup [90; 100]$, а для второй входной переменной $a_2 \in [200; 205] \cup [285; 300]$, степени активации равны нулю. Тогда при дефаззификации по формуле (9) на выходе также получится нулевое значение. Данное высказывание подтверждается проведенным моделированием. В табл. 4 сведены результаты моделирования мехатронной системы, работающей на основе жестких вычислений, а на рис. 3, а (см. вторую сторону обложки) представлена графическая модель полученных результатов. В табл. 5 сведены результаты моделирования мехатронной системы, работающей на основе мягких вычислений, а на рис. 3, б представлена графическая модель полученных результатов.

Анализ табл. 3 и 4 показывает, что мехатронная система, работающая на основе жестких вычислений, не обладает аддитивностью, а поверхность отклика при моделировании нечетких баз знаний с помощью мягких вычислений имеет более гладкую поверхность, что в последующем определит ее эффективность при обучении. Во второй части статьи будут рассмотрены алгоритмы обучения нечетких баз знаний на основе экспериментальных выборок данных. Эффективность предложенных решений при формировании нечетких баз знаний на основе мягких

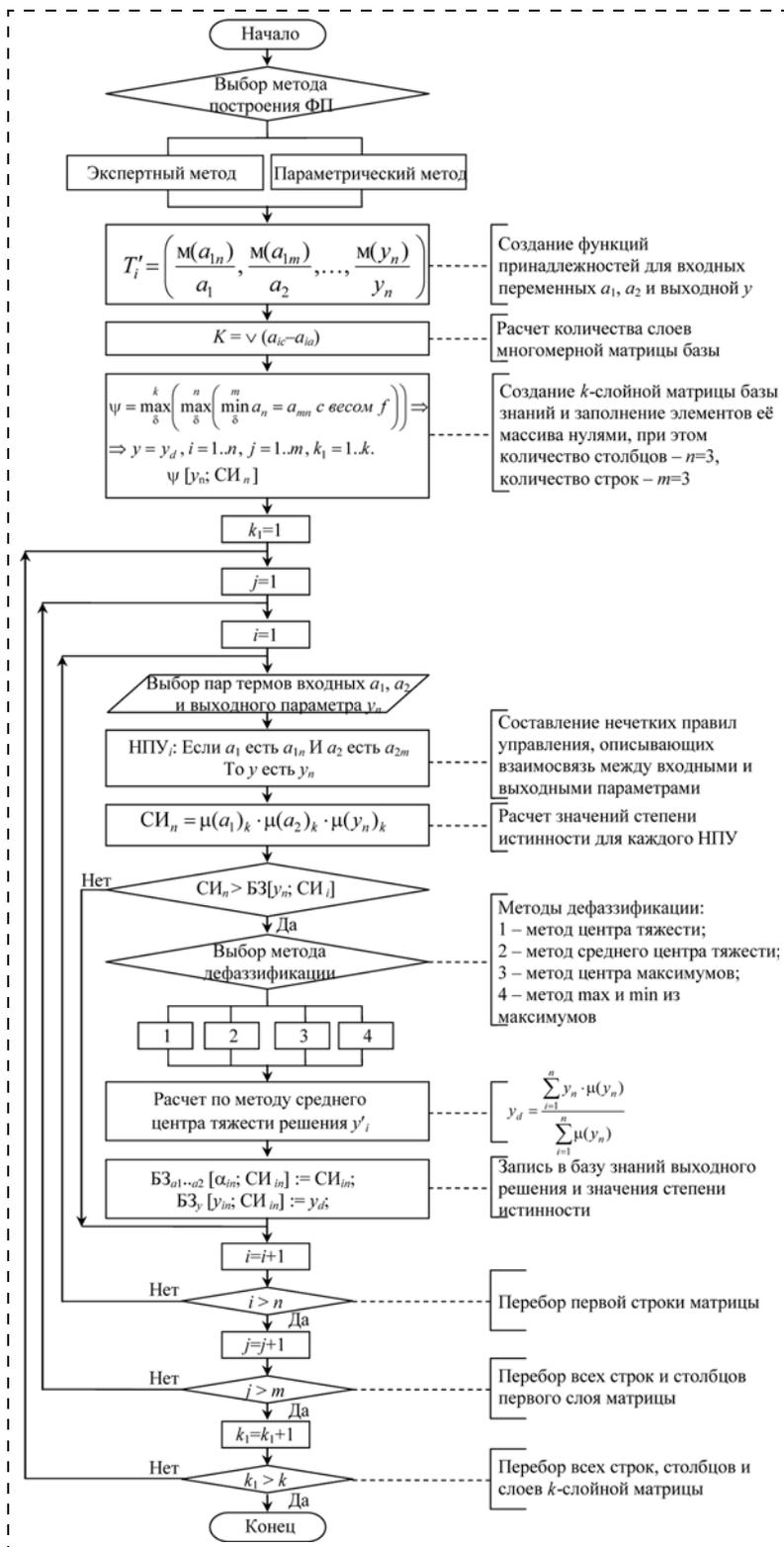


Рис. 2. Алгоритм заполнения нечеткой базы знаний

Выход мехатронной системы на основе жестких вычислений

a_2	a_1									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
210	460	469,82	461,94	450,25	447,77	445,76	444,78	445,88	460	460
220	460	468,51	461,83	452,61	450,43	449,13	448,75	450	460	460
230	460	467,79	461,65	453,49	451,5	450,23	449,88	451,12	460	460
240	455	466,63	461,83	452,61	450,43	449,13	448,75	450	455	455
250	438,03	456,45	450	438,38	438,13	438,31	438,38	438,17	438,03	438,03
260	430,04	450	443,55	435,01	433,91	432,33	432,3	431,49	430,04	430,04
270	424,74	449,85	443,27	435,01	433,91	432,33	430,06	428,89	424,74	424,74
280	423,38	457,03	449,74	438,38	437,34	435,56	432,54	431,14	423,38	423,38
290	0	469,96	461,97	448,19	445,57	443,22	440	440	0	0

Таблица 5

Выход мехатронной системы на основе мягких вычислений

a_2	a_1									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
210	460	470,47	462,78	450,51	448,12	446,1	444,98	446,27	460	460
220	460	469,05	462,58	452,96	450,95	449,57	449	450,44	460	460
230	460,03	468,3	462,32	453,85	452,03	450,71	450,24	451,69	460,03	460,03
240	455,16	467,11	462,41	452,86	450,82	449,5	449,02	450,27	455,16	455,16
250	438,5	457,28	451,22	438,79	438,41	438,52	438,53	438,36	438,5	438,5
260	430,1	451,51	444,53	435,2	434	432,45	432,36	431,54	430,1	430,1
270	424,65	451,37	444,25	435,13	433,85	432,26	430,06	428,79	424,65	424,65
280	423,28	458,82	450,98	438,61	437,28	435,46	432,52	430,96	423,28	423,28
290	450	470,69	462,68	448,28	445,65	443,18	439,95	439,98	450	450

вычислений будет оценена с помощью среднеквадратического отклонения результатов, полученных при обучении механизма мягкого нечетко-логического вывода.

Заключение

В части 1 статьи приведена методика проектирования нечетких баз знаний на основе жестких и мягких вычислений. Представленный алгоритм и примеры заполнения баз знаний позволяют оценить эффективность предложенных технических решений. Представленное в статье численное моделирование показывает, что при использовании жестких вычислений, которые используются в традиционных системах нечетко-логического вывода, мехатронная система не обладает аддитивностью.

Список литературы

1. **Martínova L. I., Grigoryev A. S., Sokolov S. V.** Diagnostics and forecasting of cutting tool wear at CNC machines // *Automation and Remote Control*. 2012. V. 73, Iss. 4. P. 742–749.
2. **Çaydaş U., Ekici S.** Support vector machines models for surface roughness prediction in CNC turning of AISI 304 austenitic stainless steel // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2012. V. 23, Iss. 3. P. 639–650.
3. **Афанасьева К. Е., Ширяев В. И.** Адаптивное оценивание и прогнозирование в динамических системах на основе гарантированного подхода // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2008. № 8. С. 2–7.
4. **Кудинов Ю. И., Иванченко К. С., Кудинов И. Ю.** Разработка и идентификация нечетких моделей прогнозирования ка-

чества // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2007. № 12. С. 12–15.

5. **Круглова Т. Н.** Интеллектуальный метод диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронных комплексов, эксплуатируемых в экстремальных условиях // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2011. № 3. С. 47–51.

6. **Емельянов С. Г., Титов В. С., Бобырь М. В.** Автоматизированные нечетко-логические системы управления. М.: Инфра-М, 2011. 176 с.

7. **Miao E., Gong Y., Niu P., Ji C., Chen H.** Robustness of thermal error compensation modeling models of CNC machine tools // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. V. 69, Iss. 9–12. P. 2593–2603.

8. **Taha Z., Rostam S.** A fuzzy ANP-ANN-based decision support system for machine tool selection in a flexible manufacturing cell // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. V. 57, Iss. 5–8. P. 719–733.

9. **Xiong J., Zhang G., Hu J., Li Y.** Forecasting process parameters for GMAW-based rapid manufacturing using closed-loop iteration based on neural network // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. V. 69, Iss. 1–4. P. 743–751.

10. **Виноградова Л. Н., Бажинов А. Н., Ершов Е. В.** Метод прогнозирования качества агломерата на основе нейронных сетей и нечетких множеств // *Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2011. № 1. С. 21–29.

11. **Ротштейн А. П., Штовба С. Д.** Моделирование надежности человека-оператора с помощью нечеткой базы знаний Сугено // *Автоматика и телемеханика*. 2009. № 1. С. 180–187.

12. **Пегат А.** Нечеткое моделирование и управление. Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 798 с.

13. **Бобырь М. В.** Модифицированный алгоритм нечетко-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2011. № 4. С. 26–32.

14. **Титов В. С., Бобырь М. В., Анциферов А. В.** Адаптивный мультисетевой алгоритм нечетко-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. № 5. С. 18–23.

15. **Бобырь М. В., Титов В. С., Акульшин Г. Ю.** Моделирование нечетко-логических систем управления на основе мягких арифметических операций // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 3. С. 29—35.

16. **Ogawa H., Fu K. S., Yao J. T. R.** Knowledge representation and inference control of SPERIL-II // Proc. of Annual Conference of the Association for Computing Machinery. San Francisco. 1984. P. 127—134.

17. **Бобырь М. В., Емельянов С. Г., Анциферов А. В.** Алгоритм самообучения адаптивных нейро-нечетких систем на ос-

нове мягких вычислений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 8. С. 3—9.

18. **Бобырь М. В., Титов В. С., Анциферов А. В.** Алгоритм высокоскоростной обработки деталей на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 21—26.

19. **Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А.** Система лазерного контроля обработки деталей в реальном времени // Промышленные АСУ и контроллеры. 2005. № 11. С. 21—24.

20. **Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 452 с.

M. V. Bobyr, Professor, fregat_mn@rambler.ru, **V. S. Titov**, Professor, **N. A. Milostnaya**, Lecturer, nat_mil@mail.ru, South-West state university, Kursk

Prediction of Mechatronic Systems Based on Soft Fuzzy Knowledge Bases. Part 1

When controlling mechatronic systems the effect of external factors on the stability, efficiency of decision-making control, precision, and other indicators of its traditionally considered regression models. However, these models have significant drawbacks, which include the inability to use their expertise in evaluating the relationship between quality characteristics and external factors. A possible way of accounting for the above factors is the use of fuzzy controllers that implement algorithms for fuzzy-logic inference. Along with the simplification of software implementation and reduction of computational complexity, these algorithms have several advantages, increase the robustness of mechatronic systems in terms of incompleteness and uncertainty of the initial information, etc. The traditional scheme of reasoning models are Mamdani and Takagi-Sugeno. However, by using the classical formulas in them finding minima and maxima they have a number of errors, such as the curse of dimensionality, which reduces their additivity. The article forecasting of complex processes occurring in mechatronic systems, it is proposed to carry out based on soft fuzzy knowledge bases synthesized by the modified algorithm of fuzzy inference. The above examples show the article soft computing efficiency compared to rigid.

Keywords: fuzzy-logic inference, fuzzy knowledge base, adaptation, prediction, soft computing, modified algorithm fuzzy-logic inference, additivity

References

1. **Martinoва L. I., Grigoryev A. S., Sokolov S. V.** Diagnostics and forecasting of cutting tool wear at CNC machines. *Automation and Remote Control*. 2012. V. 73, Iss. 4. P. 742—749.

2. **Çaydaş U., Ekici S.** Support vector machines models for surface roughness prediction in CNC turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2012. V. 23, Iss. 3. P. 639—650.

3. **Afanas'eva K. E., Shiryayev V. I.** Adaptivnoye otsenivaniye i prognozirovaniye v dinamicheskikh sistemakh na osnove garantirovannogo podkhoda. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2008. N. 8. P. 2—7.

4. **Kudinov Yu. I., Ivanchenko K. S., Kudinov I. Yu.** Razrabotka i identifikatsiya nechetkikh modeley prognozirovaniya kachestva. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2007. N. 12. P. 12—15.

5. **Kruglova T. N.** Intellektual'nyy metod diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya mekhatronnykh kompleksov, ekspluatiruemykh v ekstremal'nykh usloviyakh. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2011. N. 3. P. 47—51.

6. **Emel'yanov S. G., Titov V. S., Bobyr' M. V.** Avtomatizirovannyye nechetko-logicheskie sistemy upravleniya. M.: Infra-M, 2011. 176 p.

7. **Miao E., Gong Y., Niu P., Ji C., Chen H.** Robustness of thermal error compensation modeling models of CNC machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. V. 69, Iss. 9—12. P. 2593—2603.

8. **Taha Z., Rostam S.** A fuzzy AHP-ANN-based decision support system for machine tool selection in a flexible manufacturing cell. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. V. 57, Iss. 5—8. P. 719—733.

9. **Xiong J., Zhang G., Hu J., Li Y.** Forecasting process parameters for GMAW-based rapid manufacturing using closed-loop iteration based on neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. V. 69, Iss. 1—4. P. 743—751.

10. **Vinogradova L. N., Bazhinov A. N., Ershov E. V.** Metod prognozirovaniya kachestva aglomerata na osnove neyronnykh setey i

nechetkikh mnozhestv. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie*. 2011. N. 1. P. 21—29.

11. **Rotshteyn A. P., Shtovba S. D.** Modelirovaniye nadezhnosti cheloveka-operatora s pomoshch'yu nechetkoy bazy znaniy Sugeno. *Avtomatika i telemekhanika*. 2009. N. 1. P. 180—187.

12. **Pegat A.** Nchetkoe modelirovaniye i upravlenie. Per. s angl. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012. 798 p.

13. **Bobyr' M. V.** Modifitsirovannyy algoritm nechetko-logicheskogo vyvoda v zadachakh upravleniya oborudovaniem s ChPU. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2011. N. 4. P. 26—32.

14. **Titov V. S., Bobyr' M. V., Antsiferov A. V.** Adaptivnyy mul'ti-setevoy algoritm nechetko-logicheskogo vyvoda v zadachakh upravleniya oborudovaniem s ChPU. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2013. N. 5. P. 18—23.

15. **Bobyr' M. V., Titov V. S., Akul'shin G. Yu.** Modelirovaniye nechetko-logicheskikh sistem upravleniya na osnove myagkikh arifmeticheskikh operatsiy. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy*. 2013. N. 3. P. 29—35.

16. **Ogawa H., Fu K. S., Yao J. T. R.** Knowledge representation and inference control of SPERIL-II. *Proc. of Annual Conference of the Association for Computing Machinery*. San Francisco. 1984. P. 127—134.

17. **Bobyr' M. V., Emel'yanov S. G., Antsiferov A. V.** Algoritm samoobucheniya adaptivnykh neuro-nechetkikh sistem na osnove myagkikh vychisleniy // Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. 2013. Iss. 11. N. 8. P. 3—9.

18. **Bobyr' M. V., Titov V. S., Antsiferov A. V.** Algoritm vysokoskorostnoy obrabotki detaley na osnove nechetkoy logiki. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2012. N. 6. P. 21—26.

19. **Titov V. S., Bobyr' M. V., Milostnaya N. A.** Sistema lazer-nogo kontrolya obrabotki detaley v real'nom vremeni. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery*. 2005. N. 11. P. 21—24.

20. **Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L.** Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2008. 452 p.

УДК 004.8 + 796.012

В. Ф. Головин, канд. техн. наук, доц., medicalrobot@mail.ru,
Московский государственный индустриальный университет,
В. Е. Павловский, д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., vlpavl@mail.ru,
ИГМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва

Новые направления в медицинской и сервисной робототехнике: по материалам международной конференции MESROB 2013

Представлен обзор работ конференции MeSRob 2013, посвященной памяти крупного сербского ученого, специалиста в области биомеханики и робототехники, профессора Миомира Вукобратовича, дан обзор соответствующих российских исследований.

Ключевые слова: медицина, сервис, робототехника, точка нулевого момента, экзоскелетон, позиционно-силовое управление, реабилитация, податливость, робот для массажа, эмоциональный интеллект, шагающие роботы, гексапод, ортогональные шагающие движители

Научная школа М. Вукобратовича

В Белграде в июле 2013 г. проходила международная конференция MeSRob 2013, посвященная памяти крупного сербского ученого, специалиста в области биомеханики и робототехники Миомира Вукобратовича.

Миомир Вукобратович родился 26 декабря 1931 г. в деревне Ботос близ города Зренянин в Королевстве Югославия. В 1957 г. окончил машиностроительный факультет Белградского университета. Научная деятельность М. Вукобратовича известна в трех основных областях: в области аэронавтики (аэроупругости), в области анализа чувствительности и синтеза управления динамических систем, а наиболее длительный период его работы связан с областью теоретической и прикладной робототехники. М. Вукобратович хорошо известен в СССР и России, неоднократно выступал на механико-математическом факультете МГУ с лекциями и докладами по робототехнике. Он — почетный доктор Московского университета с 1997 г. М. Вукобратович был избран иностранным членом АН СССР 27.12.1988 г.

С начала 1965 г. М. Вукобратович работал в Белграде в институте автоматики и связи имени Михайло Пупина, где возглавлял Центр робототехники. Его труды заложили основы современной механики и ее современных ключевых разделов — биомеханики и робототехники. Под его руководством сформировалась одна из ведущих в мире школ в области механики робототехнических систем.

Одним из научных достижений школы М. Вукобратовича является разработка концепции точки нулевого момента (ZMP — zero moment point) для обеспечения устойчивой ходьбы двуногих робо-

тов [6]. Под ZMP понимается фаза естественной человеческой походки, при которой существует точка контакта ног с землей с нулевым моментом. Динамическое равновесие во время ходьбы может быть обеспечено измерением отклонения реальной точки нулевого момента от желаемой путем введения обратной связи по усилию. Рассчитываемая коррекция минимизирует разницу между реальным и идеальным положением ZMP и тем самым обеспечивает динамичное равновесие системы во время ходьбы. Следующим результатом, развивающим концепцию ZMP в задачах моделирования и управления двуногими шагающими роботами, было введение полуобратного метода, который позволяет определить состояние системы, обеспечивающей равновесие гуманоида.



Миомир Вукобратович

Концепция ZMP также весьма полезна для анализа и управления человеческой походкой в робототехнике для восстановительной медицины. Именно благодаря повышенному интересу к управляемым деформациям мягких тканей в процедурах движения конечностей в суставах пациента и при разнообразном массаже на одной из конференций М. Вукобратович познакомился с В. Ф. Головиным и потом поддерживал работы московской школы.

В период 1971—1974 гг. в сотрудничестве с Д. Стокичем М. Вукобратович предложил динамический подход к изучению антропоморфных шагающих роботов и алгоритмы управления для реализации устойчивых функциональных движений в условиях малых и больших возмущений [3, 4]. Динамическое управление манипуляционными роботами и двуногими системами передвижения осуществлялось с использованием силовой обратной связи.

Вместе с Д. Христич М. Вукобратович разработал первый в мире искусственный экзоскелетон для восстановления двигательной активности инвалидов. В эти же годы были разработаны экзоскелетон с электрическим приводом и первые в мире активные ортопедические устройства модульного типа для пациентов с ограничением движений. На рис. 1 (см. третью сторону обложки) представлен экзоскелетон с пневмоприводами, экспонируемый в Московском Политехническом музее.

В 2009 г. в соавторстве с коллегами Института автоматизации и телесвязи имени Михайло Пупина Драголюбом Сурдиловичем, Душко Катичем и российским математиком Юрием Экало в издательстве "New frontiers in robotics" М. Вукобратович публикует монографию "Dynamics and robust control of robot-environment interaction" [7] (рис. 2, см. третью сторону обложки). В монографии обсуждаются научные проблемы позиционно-силового и импедансного управления роботами с учетом их взаимодействия с реальными средами и технологическим оборудованием. К сожалению, эта монография не переведена на русский язык, и подходы математиков сербской школы известны немногим российским ученым.

Как вспоминает В. Ф. Головин: "Это был необыкновенно интеллигентный деликатнейший человек, никогда не демонстрировавший свою эрудицию. Однажды, встречая его в Москве, я на не совсем совершенном английском долго, а потому мучительно, рассказывал про свою лабораторию и как робот управляет усилиями, деформируя мягкие ткани пациента. Он терпеливо старался понять меня и терпеливо разъяснял свое понимание. И это в течение нескольких часов. У кого-нибудь хватило бы терпения? На пять минут меня вызвали. И как же я был поражен и смущен, когда услышал его чистый русский язык в беседе с лаборантами! Миомир не хотел перебивать меня. Потом я узнал, что он наизусть без акцента читает Пушкина!".

Знание русского языка и истории России позволило Миомиру Вукобратовичу от имени Президиума Белградского общества сербско-русской

дружбы в изысканно корректной форме выразить Российскому правительству конца 90-х годов сожаление о его отказе помочь пострадавшей Сербии:

"Только вербальное осуждение агрессии на нашу страну при сострадании ее мукам и восхвалении беспримерного героизма всего сербского народа, ссылки на справедливость и правду на его стороне, что отравленный средствами массовой информации мир когда-нибудь все-таки увидит, для нас, Россия, сегодня равно молчаливому согласию на наше уничтожение. Отношение мира и прежде всего Твое, наша славянская и православная мать Россия, отношение к катастрофическому положению, в котором оказался наш народ, порой зловеще напоминает нам Пилатово умывание рук перед новой величайшей Голгофой Сербии, которая сегодня единственный настоящий проверенный историей и до конца преданный друг русского народа. Превратятся ли эти предчувствия в практическую реальность? Нам трудно в это поверить. Если с помощью остального сохранившего разум мира Ты не остановишь разнузданные полчища НАТО в их безумном опустошительном нападении и при этом не отстоишь и себя, и свои интересы сегодня и здесь, в Сербии, уже завтра, дорогая Россия, на этой земле Тебе некому будет помогать и не на кого больше будет опереться. Можешь ли Ты это допустить, Россия?!"

Основные результаты исследований его как одного автора или с соавторами были опубликованы в 222 международных журнальных статьях, а также в трудах 380 международных конференций, симпозиумов и конгрессов. Профессор М. Вукобратович читал лекции более чем на 155 научных семинарах в США, Японии, России, Китае и Европе. Им и его учениками были изданы серии "Научные основы робототехники" в семи томах и "Новые рубежи робототехники". В течение последних двадцати пяти лет М. Вукобратович является одним из самых цитируемых авторов в мире в области технических наук и робототехники. Индекс цитирования трудов только его и с соавторами составляет 1600, не принимая во внимание многочисленные цитаты в ведущих научных журналах Японии, России, Китая и Индии. Миомир Вукобратович являлся Академиком Сербской академии наук и искусств. Множество признаний и наград М. Вукобратовича можно посмотреть в его Curriculum Vitae на сайте [11]. Умер Миомир Вукобратович 11 марта 2012 г.

В 2013 г. Международная конференция MESROB проходила в Белграде в Институте имени Михайло Пупина. Участники от России были поражены гостеприимным, приветливым отношением сербов к русским. Эта конференция — вторая в серии "Новые направления в медицинской и сервисной робототехнике". Первая проходила в 2012 г. в Румынии в Клуж-Напоке. Третья конференция назначена на 10—12 июля 2014 г. в Лозанне, Швейцария.

Полный текст докладов представлен в монографии "Mechanisms and Machine Science", выпущен-

ной в 2014 г. под общей редакцией Марко Чекарелли [8]. Полную программу докладов можно посмотреть на сайте [9].

Ярд докладов конференции MESROB—2013 связан с медицинской робототехникой, где выделены три новых направления. Первое состоит в применении хирургических и имплантационных роботов для повышения надежности проведения минимально инвазивных операций и сокращения времени их проведения. Второе состоит в применении сервисных роботов для обеспечения подвижности и независимости пациентов и пожилых людей. Третье состоит в использовании сетевых технологий и дистанционно управляемых недорогих роботов для здорового образа жизни и реабилитации (Huosheng Hu, United Kingdom).

Краткий обзор научных исследований, представленных на конференции MESROB-2013

Выделим работу о роботе-помощнике для тренировки верхних конечностей, она актуальна для реабилитации пациентов с последствием паралича. Проект имеет игровую направленность, что позволяет повысить мотивацию к обучению. Используется робот с тактильным интерфейсом для пользователя (Dejan V. Popovic, Serbia).

Разработке роботов, необходимых для реабилитации пациентов с пораженными нижними конечностями, с последствиями паралича или инсульта, посвящена работа Mohamed Bouri, Switzerland. Управление движениями нижних конечностей осуществляется с применением таких обратных связей, которые позволяют измерять прогресс механотерапевтических процедур. Процедуры позволяют увеличить диапазон суставных движений, увеличить пластичность суставов, повысить мышечную силу, уменьшить спазмы.

Обзор роботов, помогающих детям с отклонениями в развитии (нарушенными двигательными функциями, дисгармоничным развитием, детским церебральным параличом, слуховыми и эмоциональными расстройствами), выполнен в работе Branislav Vovocac, Serbia. Акцент сделан на развитие мотивации через игры и развлечения, через усиление взаимодействия в системе робот—ребенок, развитии реакции жестов, прикосновений, голоса (понимание и синтез речи), зрительных стимулов. Роботы для этих целей должны быть антропоморфными.

Необходимость податливости движений для медицинских роботов обсуждается в работе Petar V. Petrovic, Serbia. Экспериментальные исследования проводятся на антропоморфных роботах с рукой малого веса в прикладных задачах неинвазивной медицинской диагностики, ультразвуковой управляемой биопсии, прецизионной минимально инвазивной хирургии, основанной на ультразвуковом цифровом наблюдении анатомических структур тела пациента и генерации точно расположенных анатомических 2D-секций, так же, как генерации

пространственных образов для анатомической визуализации (3D-сонограммы), что используется для навигации хирургического инструмента. Врач перемещает ультразвуковой датчик, размещенный на конечном звене робота, по поверхности тела пациента. Робот оснащен двусторонним человеко-машинным интерфейсом с силовой обратной связью, предназначенной для обеспечения требуемых усилий взаимодействия робота и пациента. Возможна компенсация движений пациента, в том числе дыхательных. Рассматривается трехкомпонентная система врач — робот — пациент, в которой наличествует третья компонента — человеческая, в отличие от обычных объектов управления роботами — технических.

Значительная роль тактильных измерений в проектировании средств реабилитации отмечается в исследованиях Hannes Bleuler, Switzerland. Возможность сочетания тактильных измерений с позиционным и силовым управлением рассматривается как перспектива.

Разработка роботов для восстановительной медицины (для выполнения разнообразного массажа и движений конечностей в суставах) рассматривается в работе В.Ф.Головина, Россия (рис. 3, см. третью сторону обложки). Такие роботы должны иметь позиционно-силовое и биотехническое управление. Для задания траектории движения робота при взаимодействии его с мягкими тканями пациента предлагается режим силового обучения. Рассматриваются проблемы проектирования, безопасности, разработки биомехатронных модулей, социальные и экономические аспекты.

Обзор роботов для контактной лучевой терапии, позволяющих концентрировать радиацию в высоких дозах в определенных точках, представлен в работе Doina Pisla, Romania. Новейшие достижения робототехники для контактной лучевой терапии связаны с разработкой модульных роботов с параллельной структурой.

Важное новое направление — эмоциональный интеллект (рис. 4). Проблеме построения эмоционального интеллекта с участием сервисных роботов посвящена работа председателя конферен-

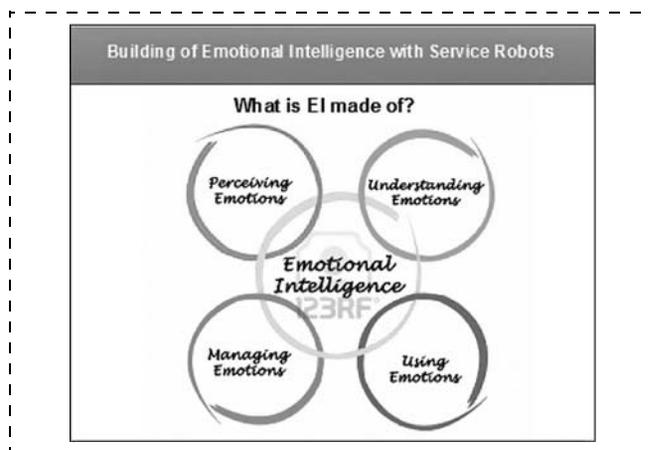


Рис. 4. Эмоциональный интеллект — структура

ции руководителя лаборатории "Робототехника" института имени Михайло Пупина профессора Александара Родича. Так же, как искусственный интеллект, эмоциональный интеллект необходим для полного описания робота и человека. Эмоциональный интеллект представляет возможность выявления, оценки и управления эмоциями самого себя, других людей и групп.

Построение модели эмоционального интеллекта включает построение эмоционально основанных и социальных признаков поведения с участием сервисных роботов. Модель личного и межличностного (социального) поведения, разработанная на основе известной в психологии теории личности последователей Юнга, вместе с моделями искусственного интеллекта предполагает познавательные возможности поведения нового поколения сервисных роботов.

Алгоритмы распознавания жестов и поз, использующие парадигмы вычислительного интеллекта и датчики типа Microsoft Kinect, рассматриваются в работе Dusko Katic, Serbia. Эти исследования предполагают один из подходов разработки естественного интерфейса человек—робот, который используется для управления колесами управляемого (4WD) мобильного робота. Проектируемая система способна воспринимать, понимать и изучать последовательность жестов и поз, ранее захваченных в видеостандартах RGB.

Работа содержит информацию об используемой камере KINECT, о деталях процесса проектирования классификатора, а также обзор результатов, которые были получены путем тестирования алгоритма.

Исследователи электротехнической лаборатории Белградского университета (Veljko Potkonjak) представили работу об управлении антропометрическими роботами. Рассматриваются схемы, алгоритмы и расчеты мышечных двигателей.

Обучение робота с подкреплением рассматривается в работе Vojan Nemes, Slovenia. Первоначальная демонстрация представляется как примитивы динамического движения, сохраняемые в базе данных действий, основанной на статистических обобщениях опыта сенсомоторных и траекторных библиотек. Всякий раз, когда это необходимо, робот получает информацию из базы данных преды-

дущих обучений и обобщает их к новой ситуации. Если обобщение не может генерировать соответствующее действие для данной ситуации, робот уточняет его с помощью подкреплений или итеративного обучения. Вообще, следует отметить, что словенская школа глубоко исследует эти принципы, ими создана специальная технология "Индуктивное логическое программирование" (ILP) [11].

Обучение робота с подкреплением рассматривается в работе Vojan Nemes.

В экспериментах участвуют самые совершенные для взаимодействия с людьми роботы LWR немецкой компании Kuka (рис. 5).

Ряд работ, доложенных на конференции, посвящен проблемам разработки мобильных роботов, гуманоидов, их автономности, походке, имитации человеческих движений (Francesco Amidoni, Italy; Shuuji Kajita Japen Christine Chevallereau, France).

Исследования российских научных школ в области робототехники

Не без влияния школы и работ профессора Миомира Вукобратовича в СССР и в России были выполнены пионерские работы по робототехнике. Поскольку их общее число огромно, отметим здесь только работы по мобильным многоногим шагающим роботам. М. Вукобратович был хорошо с ними знаком, всякий раз внимательно интересовался их новшествами при приезде в нашу страну.

Первые пионерские проекты в СССР [12, 13]. Исследования по созданию шагающих роботов имеют в современной России давнюю историю, насчитывающую более 40 лет. В СССР эксперименты по шагающим машинам начались на рубеже 70-х гг. XX века. Это были приоритетные пионерские работы, в тот период шли аналогичные исследования только в США, но отечественные исследования опережали аналогичные зарубежные работы. Организатором и вдохновителем этих работ в СССР был академик (тогда еще член-корреспондент АН СССР) Д.Е.Охочимский.

Примерно в одно и то же время — в период 1972—1975 гг. — были созданы макеты-прототипы многоногих шагающих машин-роботов в Институте прикладной математики Академии наук (руководитель — академик Д. Е. Охочимский), в МГУ в Институте механики (руководитель профессор Е. А. Девянин), а несколько ранее шагающая машина была создана в Институте машиноведения Академии наук (руководители — академик И. И. Артоболевский, профессора А. П. Бессонов и Н. В. Умнов), и эта работа вдохновила все дальнейшие исследования.

На рис. 6 показан макет шагающей машины, разработанный в Институте машиноведения Академии наук СССР.

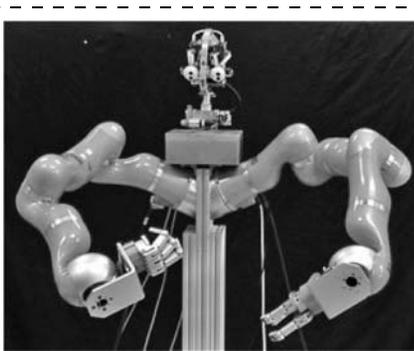


Рис. 5. Робот LWR-Kuka (Германия)

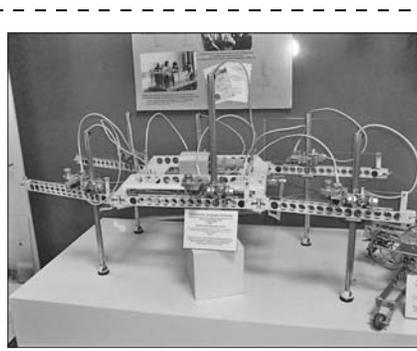


Рис. 6. Шагающая машина ИМАШ РАН. Политехнический музей, Москва

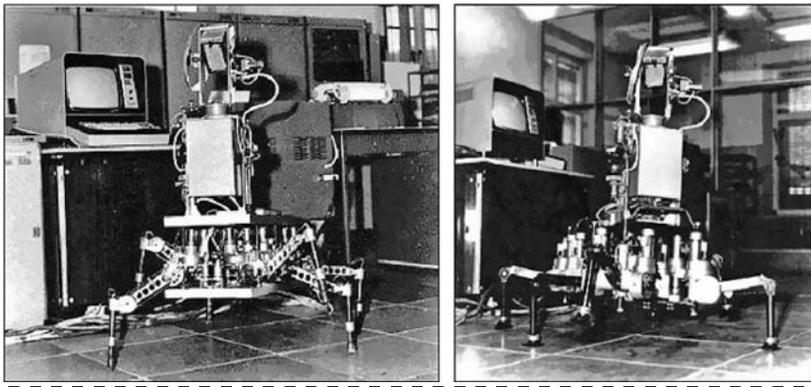


Рис. 7. Шагающие роботы ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР (фотографии 1975 г.)

В этой машине был использован оригинальный принцип организации ходьбы. Машина имеет четыре ноги с так называемыми ортогональными приводами. Их преимущества состоят в более простых расчетных схемах синтеза движения ног и корпуса аппарата.

На рис. 7 показаны макеты шестиногих шагающих машин, созданные в Институте прикладной математики АН СССР. Слева показан первый образец, созданный в содружестве ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР и Ленинградского механического института (ЛМИ), справа — второй образец, созданный несколько позднее при сотрудничестве ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР и Ленинградского института ВНИИТРАНСМАШ.

Отметим, что эти аппараты имели так называемые инсектоморфные ноги, каждая из которых имела по три степени подвижности (три степени свободы). На рис. 7 оба аппарата показаны в варианте с оснащением лазерным дальномерным устройством — лазерным измерителем расстояний (ЛИР). С помощью ЛИР роботы осматривали поверхность передвижения, и затем управляющая роботами мини-ЭВМ принимала решения о движении. Наличие шести ног позволяло решить принципиальную задачу устойчивости движения робота — робот мог передвигаться статически устойчивой походкой, если в каждый момент времени в опоре находилось

не менее трех ног. Именно это обстоятельство определило интерес к многоногим машинам.

Позднее на базе этих разработок совместно ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР и ВНИИТРАНСМАШ в 1975 г. был создан большой натурный макет шестиногой машины НМША (натурный макет шагающего аппарата), которая была способна нести человека-оператора. Масса машины 750 кг, скорость движения 0,7 км/ч, грузоподъемность 50 кг, дорожный просвет 1,5 м (рис. 8, см. третью сторону обложки).

Указанные исследования продолжают в настоящее время. На рис. 9 показан третий макет робота, создаваемый как модификация предыдущих в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН.

На роботе реализована оригинальная бортовая микропроцессорная система управления, построенная как бортовая компьютерная управляющая сеть. Робот оснащен необходимым набором сенсоров.

Работы по исследованию шестиногих аппаратов проводились и продолжают в Институте механики МГУ. Они ведутся на основе модернизации самого первого проекта этого института, в котором создавался робот МАША (МАшина ШАгающая).

На рис. 10 показана первая (рис. 10, а) и современная (рис. 10, б) версии робота МАША, на второй фотографии аппарат показан на переднем плане. Робот также имеет шесть инсектоморфных ног и снабжен необходимыми сенсорами.

Все указанные работы потребовали значительных усилий в исследованиях задач механики ходьбы многоногих машин и задач управления системами с большим числом степеней свободы (для изучаемых машин — в ногах). Но эти задачи были успешно решены.

Современные шагающие машины России. В современную эпоху эти исследования подхватила научная школа в Волгоградском государственном техническом университете, руководитель школы — профессор Е. С. Брискин [14], соруководителем работ является профессор В. В. Жога.

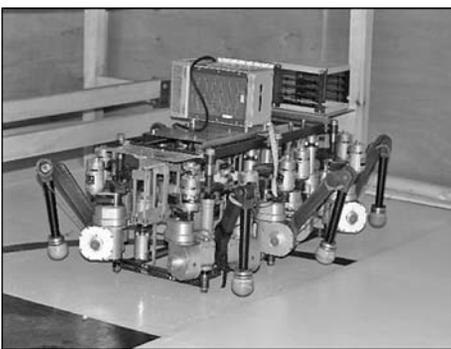
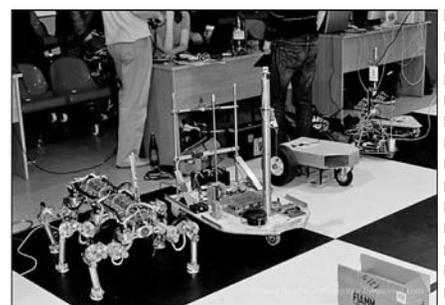


Рис. 9. Шагающий робот ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. Современная версия. Фотографии 2009–2010 гг.



а)



б)

Рис. 10. Робот МАША (Институт механики МГУ): а — первая (1975 г.); б — современная версия

Здесь создаются машины с так называемыми цикловыми механизмами шагания и машины с оригинальными ортогональными приводами движителей. Примером таких разработок может служить шагающая машина "Восьминог", показанная на рис. 11 (см. третью сторону обложки). В этой разработке механизмы шагания построены на идее лямбда-механизмов Чебышева, поэтому цикл шагания фактически создается механическим устройством ноги. Возможно, это несколько ограничивает адаптационные возможности машины, но ее бесспорным преимуществом является значительная простота системы управления и весьма высокая опорная проходимость машины. Машина способна двигаться и работать на очень слабых грунтах, как показывает рис. 11, б.

Еще одно направление работ ВолгГТУ — машины с ортогональными шагающими движителями.

На рис. 12 показан малый макет восьминогного робота с ортогональными приводами (характерный размер машины — 1 м). Движитель организован как два субмодуля с четырьмя опорами каждый, и для реализации поворота машины эти субмодули могут поворачиваться друг относительно



Рис. 12. Робот с ортогонально-поворотным движителем (ВолгГТУ)

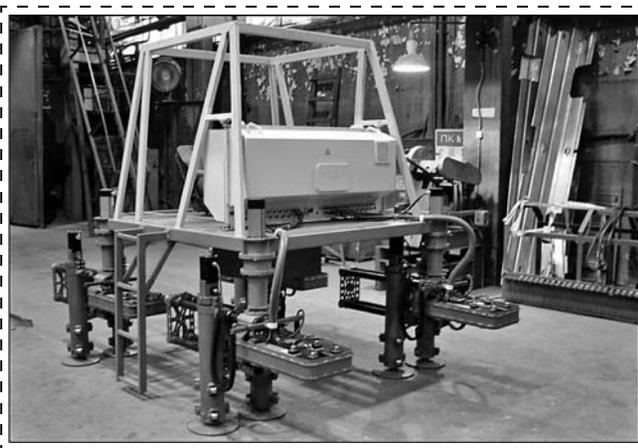


Рис. 13. Шагающая машина "Ортоног" (ВолгГТУ, 2011—2014 гг.)

друга. Система управления для этой машины разрабатывается в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН.

Как развитие этих исследований в ВолгГТУ выполняется проект (научный руководитель профессор Е. С. Брискин) по созданию большой шагающей машины общей массой 2 т и грузоподъемностью до 1 т с четырьмя спаренными ортогонально-поворотными движителями (рис. 13). В настоящее время завершено изготовление машины, начаты интенсивные работы по программированию ее системы управления.

Заключение

Как показал анализ работ MESROB-2013, исследования сложных роботов — антропоморфных роботов, многоногих аппаратов, роботов со сложными руками — интенсивно продолжаются в современном мире. Они выходят уже, в частности, на исследование и применение новых методов искусственного интеллекта, что делает таких роботов реальными помощниками человека.

Основы этих работ были успешно заложены российскими и сербскими учеными. Задачи эти сложны, но актуальны, как показывают и результаты MESROB-2013 и история первых исследований в СССР и России, и тем важнее интенсивно их развивать.

Список литературы

1. **Томович Р., Вукобратович М.** Общая теория чувствительности. М.: Советское радио, 1972.
2. **Вукобратович М.** Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. М.: Мир, 1976. 544 с.
3. **Вукобратович М., Стокич Д.** Управление манипуляционными роботами. Теория и приложения. М.: Наука, 1985.
4. **Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н.** Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами. М.: Мир, 1989.
5. **Vukobratovic M., Ekalo Y.** Unified Approach to Control Laws Synthesis for Robotic Manipulators in Contact with Dynamic Environment, Tutorial S5: Force and Contact Control in Robotic Systems // Proc. IEEE, Int. Conference on Robotics and Automation. 1993. P. 213—229.
6. **Vukobratovic M., Borovac B., Surdilovic D.** Zero Moment Point — Proper Interpretation and the Application in Gait Control // Intelligent Journal Engineering & Automation Problems. 2002. N. 3. P. 3—14.
7. **Vukobratovic M., Surdilovic D., Ecalo Y., Kabic D.** Dynamics and robust control of robot — environment interaction // New frontiers in robotics. World Scientific Publishing Company, 2009.
8. **Rodic' A., Pisla D., Bleuler H.** Mechanisms and Machine Science. New trends in medical and service robots. Challenges and Solutions. Springer International Publishing Switzerland. 2014.
9. URL: http://www.pupin.rs/RnDProfile/MESROB2013_final.pdf.
10. URL: <http://www.nationmaster.com/encyclopedia/Miomir-Vukobratovic>.
11. **Братко И.** Алгоритмы искусственного интеллекта на языке PROLOG. М.: Изд. дом "Вильямс", 2004.
12. **Охонимский Д. Е., Платонов А. К., Боровин Г. К., Карпов И. И.** Моделирование на ЦВМ движения шагающего аппарата // Известия АН СССР, Техническая кибернетика. 1972. № 3. С. 47—59.
13. **Павловский В. Е.** О разработках шагающих машин // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2013. № 101. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101>
14. **Брискин Е. С., Жога В. В., Чернышев В. В., Малолетов А. В.** Основы расчета и проектирования шагающих машин с цикловыми движителями. М.: Машиностроение-1, 2006.

The New Trends in a Medical and Service Robotics: on Materials of the International MESROB 2013 Conference

The paper deals with the review of works of 'The Workshop on new trends in MEDical and Service ROBotics (MESROB) — 2013' conference, devoted in 2013 to the memory of the well-known Serbian scientist, professor Miomir Vukobratovich, the expert in the field of biomechanics and robotics (conference took place in Belgrade at Mihailo Pupin's Institute where for a long time M. Vukobratovich worked). The review of the corresponding Russian researches is given as well.

In the review of MeSRob 2013 three new important directions in a service and medical robotics are noted — the first consists in use of surgical and implantation robots for increase of reliability of carrying out minimum invasive operations and reductions of time of their carrying out, the second consists in use of service robots for ensuring mobility and independence of patients and elderly people, the third consists in use of network technologies and remotely operated inexpensive robots for a healthy lifestyle and rehabilitation. Examples are given. Among them it is interesting to note the concept of the emotional intelligence, allowing to realize new type of the interface of robot and human being.

The history of the Russian developments of complicated walking robots is given in the review of the Russian researches, developments are specified of Research Institute for Machine Science named after A. A. Blagonravov (IMASH) RAS, Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Institute of Mechanics of the Moscow State University, modern developments of the Volgograd scientific school in Volgograd state technical university. A lot of photos of the created devices are provided.

Keywords: medicine, service, robotics, zero moment point, exoskeleton, position/force control, rehabilitation, compliance, massage robot, emotional intellect, walking robots, hexapod apparatus, orthogonal walking movers

References

1. **Tomovich R., Vukobratovich M.** Obshchaya teoriya chuvstvitel'nosti. M.: Sovetskoe radio, 1972.
2. **Vukobratovich M.** Shagayushchie roboty i antropomorfnye mekhanizmy. M.: Mir, 1976. 544 p.
3. **Vukobratovich M., Stokich D.** Upravlenie manipulyatsionnymi robotami. Teoriya i prilozheniya. M.: Nauka, 1985.
4. **Vukobratovich M., Stokich D., Kirchanski N.** Neadaptivnoe i adaptivnoe upravlenie manipulyatsionnymi robotami. M.: Mir, 1989.
5. **Vukobratovich M., Ekalo Y.** Unified Approach to Control Laws Synthesis for Robotic Manipulators in Contact with Dynamic Environment, Tutorial S5: Force and Contact Control in Robotic Systems. *Proc. IEEE, Int. Conference on Robotics and Automation*. 1993. P. 213—229.
6. **Vukobratovich M., Borovac B., Surdilovic D.** Zero Moment Point — Proper Interpretation and the Application in Gait Control. *Intelligent Journal Engineering & Automation Problems*. 2002. N. 3. P. 3—14.
7. **Vukobratovich M., Surdilovic D., Ecalo Y., Kabic D.** Dynamics and robust control of robot — environment interaction. *New frontiers in robotics*. World Scientific Publishing Company, 2009.
8. **Rodic A., Pisla D., Bleuler H.** Mechanisms and Machine Science. New trends in medical and service robots. Challenges and Solutions. Springer International Publishing Switzerland. 2014.
9. **URL:** http://www.pupin.rs/RnDProfile/MESROB2013_final.pdf.
10. **URL:** <http://www.nationmaster.com/encyclopedia/Miomir-Vukobratovic>.
11. **Bratko I.** Algoritmy iskustvennogo intelekta na yazyke PROLOG. M.: Izd. dom "Vil'yams", 2004.
12. **Okhotsimskiy D. E., Platonov A. K., Borovin G. K., Karpov I. I.** Modelirovanie na TsVM dvizheniya shagayushchego apparata. *Izvestiya AN SSSR, Tekhnicheskaya kibernetika*. 1972. N. 3. P. 47—59.
13. **Pavlovskiy V. E.** O razrabotkakh shagayushchikh mashin. *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha RAN*. 2013. N. 101. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101>
14. **Briskin E. S., Zhoga V. V., Chernyshev V. V., Maloletov A. V.** Osnovy rascheta i proektirovaniya shagayushchikh mashin s tsiklovymi dvizhitelyami. M.: Mashinostroenie-1, 2006.

УДК 519.713(075)

Е. И. Воробьев, д-р техн. наук, проф., ИМАШ РАН им. А. А. Благонравова,
В. И. Чижиков, канд. техн. наук, доц., vichizhikov@gmail.com, **А. В. Михеев**, мл. науч. сотр.,
Московский государственный университет приборостроения и информатики

Разработка моделей и алгоритмов управления подвижными элементами пневматического протеза кисти руки

Рассмотрено решение задачи автономного адаптивного управления протезом от стопы оператора в предположении, что управляемая система может обладать незнакомой оператору внутренней моделью. Представлена аналитическая оценка статической устойчивости пневмоаккумулятора как источника энергии протеза. Предложена кинематическая схема протеза с механизмом предплечья без избыточных связей с пневмоприводом на основе тонкостенных управляемых оболочек. Синтезирован компенсационный алгоритм управления подвижными элементами протеза с возможностью его использования в условиях, когда управляемая система может обладать незнакомой оператору внутренней моделью.

Ключевые слова: пневматический протез, пульт-стелька, управление, пневмоаккумулятор, статическая устойчивость, адаптивность

Введение

Создание технических средств для восстановления способности пациентов к передвижению и самообслуживанию является сложной и во многом нерешенной проблемой. Обзор информационных источников показал, что сложность решения проблемы заключается не только в том, что необходимо создавать легкие и прочные устройства с высоким уровнем миниатюризации отдельных частей, но главным образом в принципах построения систем управления. В настоящее время имеются практические позитивные результаты. Так, например, фирма Touch Bionics выпустила на мировой рынок стационарные и полностью съёмные электронные роботизированные протезы кистей рук и отдельных пальцев. Биомеханические протезные системы ProDigits и i-LIMB имеют унифицированные взаимозаменяемые узлы, в том числе и фаланги пальцев, питаются от аккумуляторов и программируются через интерфейс Bluetooth.

Помимо очевидных технических проблем, связанных с непосредственным конструированием протезов конечностей, обеспечением их энергетического снабжения и адекватных длительностей реакций на команды, а также с наличием чувствительных элементов и обратных связей, главное затруднение видится именно в создании адекватной поставленным задачам системы управления. Поскольку управление требует проходимости прямых команд и существования обратных связей, то имеет смысл сформулировать требования к средствам измерения в контексте создания системы управления.

Система управления исполнительным устройством протеза по своей сути является информационно-измерительной управляющей системой, входными сигналами для которой являются регистрируемые первичными сенсорами сигналы. В результате обработки сигналов, поступающих в информационно-измерительную систему управления протезом (ИИСУП), формируется управляющее воздействие, которое подается на исполнительные механизмы (приводы протеза). Как показывает анализ, область создания ИИСУП является одной из наиболее консервативных. Не останавливаясь на достоинствах и недостатках использования информационно-измерительной системы управления бионическим протезом (ИИСУБП), отметим, что авторы сделали выбор в пользу командной дистанционной системы управления протезом. Наличие человека в контуре управления обеспечивает выполнение высококачественных операций в сложных и изменяющихся во времени условиях. Основным преимуществом предлагаемого метода управления является тот факт, что он не требует сложного и дорогостоящего оборудования и, соответственно, затрат на его эксплуатацию.

Функциональная схема и кинематика исполнительный части протеза кисти

На рис. 1 показана реализованная на практике функциональная схема протеза кисти руки с управляемыми пневматическими упругими элементами (сильфоны 12) в качестве приводов. Контур управления включает в себя оператора с пультом-стелькой

управления 5, который размещен на стопе, систему управления и исполнительный механизм захвата (пальцев). На пульте-стельке управления соответствующим образом выполнены контактные датчики, принимающие сигналы оператора, которые через усилители 2 поступают на электромагнитный пневмораспределитель 10. С учетом особенности работы пневмораспределителей предусмотрен глушитель шума 11. Возвратные пружины 13 обеспечивают пальцам нормально раскрытое положение. Усилие захвата создают сильфоны-приводы, деформируемые избыточным давлением воздуха, поступающим из ресивера 9, давление в котором поддерживается насосом постоянной производительности 4. Давление в ресивере настроено на максимальную мощность, которую может развить протез при захвате предмета. Заявки на выдачу газа из ресивера имеют вероятностный характер, и проблема поддержания устойчивой настройки ресивера, инвариантной к внешним возмущениям, рассматривается ниже.

Функциональные возможности рассмотренной механической исполнительный системы невелики, и число сочетаний

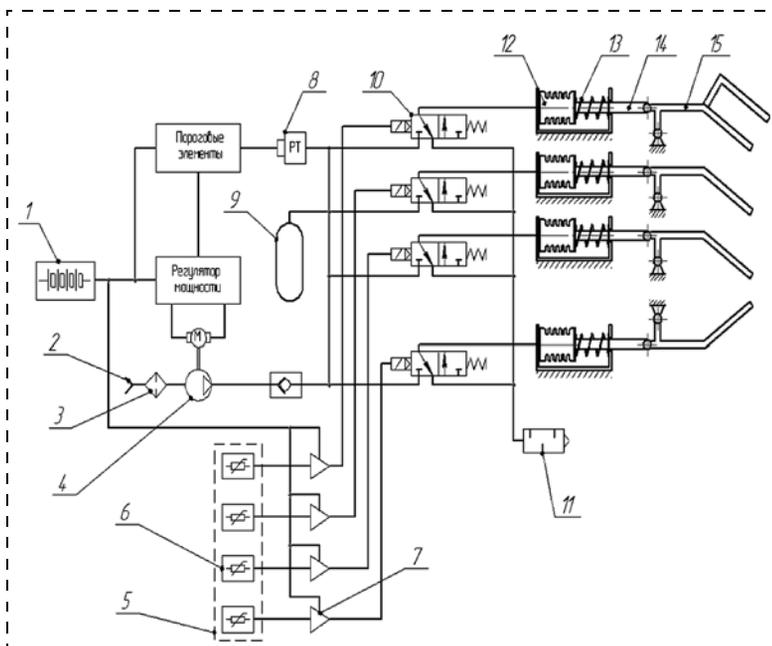


Рис. 1. Функциональная схема протеза руки с управляемыми пневматическими упругими элементами:

1 — аккумулятор; 2 — воздухозаборник; 3 — воздушный фильтр; 4 — компрессор; 5 — пульт-стелька; 6 — контактный датчик на пульте-стельке; 7 — усилитель; 8 — датчик давления; 9 — ресивер; 10 — электромагнитный пневмораспределитель; 11 — глушитель шума; 12 — сильфон привода пальца; 13 — возвратная пружина; 14 — тяга; 15 — рычаг поворота пальца

из n звеньев (пальцев) по k (захват противоположно расположенными пальцами) составляет $C_4^2 = \frac{4!}{2!(4-2)!} = 6$, где $n = 4$, $k = 2$. Конструкция пальца представлена одним подвижным звеном без элементов очувствления.

Более совершенная исполнительная система кисти протеза с увеличенной функциональностью предполагает приближение конструкции кисти и предплечья по кинематическим характеристикам к подвижности реального объекта — руки.

Упругие элементы привода выполняют функцию мышц, и в связи с этим следует упомянуть о принципе работы мышц, так как это необходимо для разъяснений приводимого ниже принципа размещения упругих управляемых элементов, имитирующих сокращения мышц при реализации требуемых перемещений силового управления.

Мышца представляет собой привод одностороннего действия, т. е. при поступлении сигнала она создает усилие в одном направлении. При развитии усилия в обратном направлении включаются мышцы-антагонисты. Таким образом, в качестве исполнительных элементов приводов, имитирующих работу мышц, следует использовать такие, которые обеспечивают статическую устойчивость подвижных элементов привода около положения равновесия. Совершенно очевидно, что таким свойством обладают упругие элементы, построенные из оболочек с незамкнутым или замкнутым контуром с постоянной или переменной опорной поверхностью [3].

Рассмотрим проектирование исполнительных частей протеза верхних конечностей. Протезируются пальцы, кисти, предплечье, плечо и вся верхняя конечность. Полезность протеза зависит от конструкции кисти, обеспечивающей ее многофункциональность в смысле адаптации к предметам различной формы и возможности выполнять общепринятые манипулирования для самообслуживания в рабочем пространстве. В некоторых случаях кисть протеза можно заменить различными приспособлениями, обеспечивающими узкий круг манипуляций для самообслуживания и труда. В активных протезах приводом подвижных звеньев служат пневматические и электрические устройства, на которые поступают управляющие сигналы, вырабатываемые в виде биотоков, снятых и преобразованных с мышц культи предплечья. Источником энергии служат пневматические и электрические аккумуляторы, имеющие возможность внешней подзарядки.

Типовая кинематическая схема кисти активного протеза руки (рис. 2) содержит пять разомкнутых трехзвенных кинематических цепей, каждая из которых содержит звенья 1, 2, 3, приводимые в движение гибкими связями 4, 5, 6, с кинематическими парами 8, 9, 10 и отклоняющими элементами 7 на оси каждой пары. Все кинематические цепи базируются на подвижном основании 11 (запястье). Каждая цепь предназначена для моделирования

движения соответствующего пальца протеза. Вращательное движение каждого звена пальца осуществляется роликоточным механизмом, ведущим звеном которого является управляемый упругий кинематический элемент 12 (сильфон, трубка Бурдона), деформируемый избыточным давлением воздуха в полости. Поступление воздуха осуществляется из ресивера через регулируемый дроссель. Такая конструкция кисти образует активный пружинный схват. Пять пружин 12 с дроссельным управлением, наполняемых газом из одного ресивера, обеспечивают требуемые перемещения, которые дают возможность размещать в кисти протеза предметы разнообразной формы. Очевидно, что для того, чтобы обеспечить максимально допустимое перемещение каждого пальца протеза, необходимо в каждой вращательной паре повернуть звенья 1, 2, 3 на угол $\pi/2$, для чего соотношение между линейным перемещением λ и радиусом ролика r с закрепленной на нем гибкой связью должно находиться в соотношении $r/\lambda = 1,57$. Дифференцированное распределение воздуха из ресивера по упругим кинематическим соединениям основано на дроссельном регулировании каждого соединения, а наличие силового очувствления на звеньях 1 кисти протеза придает ему свойства адаптивности к форме предмета.

Рассмотрим возможность реализации дифференцированного распределения движений протеза (пальцев, кисти, предплечья) на основе пневмопривода. Исполнительными элементами в предлагаемом приводе являются тонкостенные управляемые оболочки (сильфоны, трубки Бурдона), которые выполняют функцию кинематических соединений [5, 7]. Допустим, что имеется ресивер, обслуживающий подвижность пальцев протеза, в котором поддерживается постоянное давление от автономного источника энергии. Известно, что относительный угол раскрытия $\frac{\Delta\varphi}{\varphi}$ [1] пружины Бурдона

является линейной функцией избыточного давления P , при котором развивается тяговое усилие. Тогда для случая распределения избыточного дав-

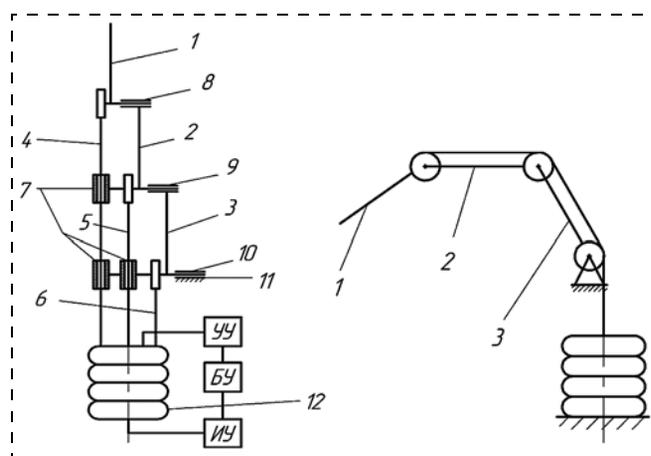


Рис. 2. Кинематическая схема активного протеза кисти руки

ления по пяти пальцам протеза выражение для давления имеет вид

$$P = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5)P = P \sum_{a=1}^5 a_i,$$

где a_i — коэффициенты, пропорциональные отношению углов раскрытия, причем $\sum_{a=1}^5 a_i = 1$.

Как упоминалось выше, давление в ресивере настроено на максимальную мощность, которую может развить протез при захвате предмета.

Нетрудно показать, что в осевом направлении охватываемого предмета звенья 1, 2, 3 каждого пальца, при упомянутом выше распределении газа, перемещаются согласно размерной цепи в пяти точках осевого направления.

Подвижность запястья реализует механизм, кинематическая схема которого показана на рис. 3. Механизм содержит основание 1, на котором установлены под углом $2\pi/n$ друг к другу сиффоны 2 (3),

4 (5), 6 (7), 8 (9), где n — число сиффонов, а сиффоны, отмеченные в скобках, установлены на тех же позициях ответно к соответствующим сиффонам с номерами без скобок, а также жесткая стойка 10, на которой шарнирно закреплен исполнительный орган — кисть протеза, состоящая из стержня 11 и плоских ведущей 12 и ведомой 13 тарелок, шарнирно закрепленных на нем посредством сферических шарниров 14 на некотором расстоянии и связанных между собой гибкими предварительно напряженными связями 15. Кинематические цепи пальцев 16 жестко закреплены на ведомой тарелке 13, управляемые пружины связаны с ведущей тарелкой аналогично связям 15.

Устройство работает следующим образом. Воздух под давлением согласованно поступает в полость сиффонов 2 (3) и 6 (7), расположенных противоположно на диаметральной прямой. Упругие элементы под действием избыточного давления синхронно деформируются в противоположные стороны, например 2 и (7), создавая момент и соответствующий поворот ведущей тарелки. Поворот в обратную сторону относительно рассматриваемой оси выполняется в обратной последовательности путем создания давления в сиффонах (3), 6.

Использование в предлагаемой конструкции гибких предварительно напряженных связей позволяет получить беззазорную конструкцию, что наряду с использованием силовых управляемых упругих связей дает как возможность позиционирования, так и ее точность. Конструкция отличается простотой и низкой металлоемкостью, позволяет осуществлять большие перемещения. Ведомая тарелка с блоком кинематических цепей, имитирующих пальцы протеза, имеет возможность описывать сферическую траекторию в пространстве относительно жесткой стойки 10 в зависимости от согласованной работы упругих управляемых кинематических соединений.

Диапазон выполняемых работ зависит и от размеров тарелок, которые могут быть выполнены сменными, а также от места закрепления гибких связей на них и их числа. Поскольку тарелки связаны со стержнем посредством сферических кинематических пар, эквивалентных кинематической паре третьего класса, то адаптивность исполнительного звена, жестко прикрепленного к ведомой тарелке, определяется колебаниями тарелки, управляемыми соответствующими сиффонами. Существенный эффект конструкции определяется широкой адаптивностью относительно малых движений исполнительного звена в зоне позиционирования в целях точного охвата перемещаемого объекта.

Энергоносителем, как упоминалось выше, является сжатый воздух, размещаемый в ресивере, который при определенных условиях можно считать пневмоаккумулятором. На рис. 4 показана схема ресивера, который представлен как объект с дроссельными отверстиями $f_1(t)$ и $f_2(t)$ с входным P_1 и выходным P_2 избыточными давлениями.

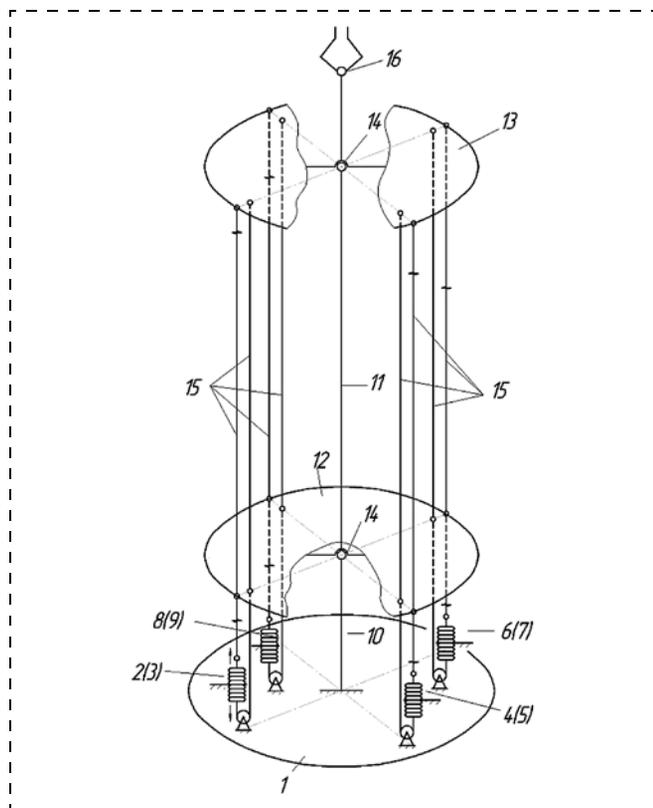


Рис. 3. Кинематическая схема самоустанавливающегося механизма запястья

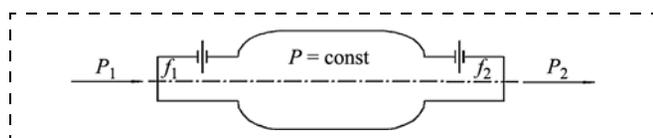


Рис. 4. Расчетная схема пневматического аккумулятора под нагрузкой

Расчет пневматического энергоносителя протеза

Расчет пневматического энергоносителя протеза необходим для поддержания заданного уровня давления в ресивере в целях надежного функционирования исполнительного устройства. Из ресивера воздух поступает в упругие управляемые кинематические соединения (сильфоны или трубки Бурдона), нагруженные тяговыми силами, передаваемыми через гибкие связи от пальцев протеза. Представим ресивер (как и каждое упругое кинематическое соединение) как статический неустойчивый объект, в котором на входе установлен дроссель с сечением $f_1(t)$, а на выходе — дроссель с сечением $f_2(t)$. Упругая реакция относительно положения равновесия определяется равенством

$$R(\lambda, \Delta G) = (F_0 + \Delta F)(\Delta P), \quad (1)$$

где λ — перемещение подвижных звеньев протеза, соответствующее поступившей массе воздуха; ΔG — масса циркулирующего воздуха в полости элемента между объемами в положении равновесия и в отклоненном от него состоянии; ΔP — разность между давлением воздуха в полости в положении равновесия и текущим давлением; F_0 и ΔF — площадь и приращение площади поперечного сечения управляемого упругого элемента.

Воздух под давлением P_1 , большим критического, поступает через сечение $f_1(t)$ в полость объема $V_0 + \Delta V$, где устанавливается давление P_c , соответствующее статическому равновесию при перемещении λ . Следовательно, истечение через дроссель $f_1(t)$ будет сверхкритическим. Газ через сечение $f_2(t)$ поступает в атмосферу под давлением P_2 , меньшим критического. В этом случае истечение газа является докритическим.

Уравнение динамики в полости ресивера можно записать в виде

$$(V_0 + \Delta V)\dot{\gamma} = G_1 - G_2, \quad (2)$$

где γ — удельная масса газа в объеме; G_1, G_2 — массовые расходы газа через сечения $f_1(t)$ и $f_2(t)$ соответственно. Обозначим $V_0 + \Delta V = V_c$. Тогда при малом изменении температуры газа уравнение (2) будет иметь вид

$$\frac{V_c}{RT} \dot{P} = G_1 - G_2. \quad (3)$$

При сверхкритическом истечении через сечение $f_1(t)$ массовый расход определяется по формуле

$$G_1 = \mu f_1(t) \sqrt{\frac{2gk}{k+1} (2/k+1)^{\frac{2}{k-1}} \frac{P_1}{v_1}}, \quad (4)$$

где k — показатель адиабаты газа; v_1 — удельный объем газа, протекающего через сечение $f_1(t)$.

Выражая v_1 через плотность с помощью подстановки $\frac{1}{v_1} = \frac{P_1}{RT}$, можно привести формулу (4) к виду

$$G_1 = \frac{\mu k_1 f_1(t)}{\sqrt{RT}} P_1, \quad (5)$$

$$\text{где } k_1 = \sqrt{\frac{2gk}{k+1} (2/k+1)^{\frac{2}{k-1}}}.$$

Для докритического истечения газа через сечение $f_2(t)$ можно найти его массовый расход:

$$G_2 = \mu f_2(t) \sqrt{\frac{2gk}{k-1} \frac{P_c}{V_c} \left[\left(\frac{P_2}{P_c} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_c} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (6)$$

Формулу (6) с учетом упрощений приводим к виду

$$G_2 = \mu f_2(t) k_2 \sqrt{\frac{P_c(P_c - P_2)}{RT}}, \quad (7)$$

где T — температура газа внутри кинематического соединения.

Подставляя полученные выражения (5) и (7) в уравнение (3), получим

$$\frac{V_c}{RT} \dot{P} = \frac{\mu k_1 f_1(t)}{\sqrt{RT}} P_1 - \mu k_2 f_2(t) \sqrt{\frac{P_c(P_c - P_2)}{RT}}. \quad (8)$$

Линеаризация уравнения (8) проводится при условии, что давления P_1 и P_2 являются постоянными:

$$\begin{aligned} \frac{V_c}{RT} \dot{P} &= \frac{\mu k_1 f_{10}(t)}{\sqrt{RT}} P_1 + \frac{\mu k_1 P_1}{\sqrt{RT}} \Delta f_1(t) - \\ &- \mu k_2 f_{20}(t) \sqrt{\frac{P_c(P_c - P_2)}{RT}} - \mu k_2 \sqrt{\frac{P_c(P_c - P_2)}{RT}} \Delta f_2(t) - \\ &- \mu k_2 f_{20}(t) \frac{1}{\sqrt{RT}} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_{c0}}{P_{c0} - P_2}} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_{c0} - P_2}{P_{c0}}} \right] \Delta P. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение установившегося режима в полости упругого элемента имеет вид

$$\frac{\mu k_1 f_{10}(t)}{\sqrt{RT}} P_1 - \mu k_2 f_{20}(t) \sqrt{\frac{P_{c0}(P_{c0} - P_2)}{RT}} = 0. \quad (10)$$

Тогда уравнение (9) в приращениях принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{V_c}{RT} \dot{P} &= \frac{\mu k_1 P_1}{\sqrt{RT}} \Delta f_1(t) - \mu k_2 \sqrt{\frac{P_{c0}(P_{c0} - P_2)}{RT}} \Delta f_2(t) - \\ &- \mu k_2 f_{20}(t) \frac{1}{2\sqrt{RT}} \left[\sqrt{\frac{P_{c0}}{P_{c0} - P_2}} + \sqrt{\frac{P_{c0} - P_2}{P_{c0}}} \right] \Delta P. \end{aligned} \quad (11)$$

Преобразуем последнее уравнение, разделив его на расход в установившемся состоянии G_0 , а также выполнив очевидные преобразования при приращениях:

$$\frac{V_c P_{c0}}{RTG_0} \frac{d\left(\frac{\Delta P}{P_{c0}}\right)}{dt} = \frac{\mu k_1 P_1 f_{10}(t)}{G_0 \sqrt{RT}} \frac{\Delta f_1}{f_{10}(t)} - \mu k_2 f_{20}(t) \times \\ \times \frac{1}{G_0} \sqrt{\frac{P_{c0}(P_{c0} - P_2)}{RT}} \frac{\Delta f_2}{f_{20}(t)} - \mu k_2 f_{20}(t) \frac{P_{c0}}{2G_0 \sqrt{RT}} \times \\ \times \left[\sqrt{\frac{P_{c0}}{P_{c0} - P_2}} + \sqrt{\frac{P_{c0} - P_2}{P_{c0}}} \right] \frac{\Delta P}{P_{c0}}. \quad (12)$$

Из уравнения для установившегося режима (10) имеем

$$G_0 = \frac{\mu k_1 f_{10}(t)}{\sqrt{RT}} P_1 = \mu k_2 f_{20}(t) \sqrt{\frac{P_{c0}(P_{c0} - P_2)}{RT}}. \quad (13)$$

Тогда уравнение в приращениях (12) с учетом соотношения (13) будет иметь вид

$$\frac{V_c P_{c0}}{RTG_0} \frac{d\left(\frac{\Delta P}{P_{c0}}\right)}{dt} + \frac{2P_{c0} - P_2}{2(P_{c0} - P_2)P_{c0}} \frac{\Delta P}{P_{c0}} = \frac{\Delta f_1}{f_{10}(t)} - \frac{\Delta f_2}{f_{20}(t)}. \quad (14)$$

Вводя новые переменные $\frac{\Delta P}{P_{c0}} = \eta$; $\frac{\Delta f_1}{f_{10}(t)} = v$; $\frac{\Delta f_2}{f_{20}(t)} = \lambda$; $\frac{V_c P_{c0}}{RTG_0} = T_0$; $\frac{2P_{c0} - P_2}{2(P_{c0} - P_2)} = \rho$, безразмерное уравнение (14) можно представить в виде

$$T_0 \dot{\eta} + \rho \eta(t) = v(t) - \lambda(t). \quad (15)$$

Линейное уравнение (15) описывает динамику процесса в кинематическом соединении. Параметр этого уравнения ρ называется степенью самовыравнивания объекта регулирования.

Если принять, что дроссель на выходе не меняет своего сечения, т. е. $\Delta f_2(t) = 0$, то уравнение (15) принимает следующий вид:

$$T_0 \dot{\eta} + \rho \eta(t) = v(t). \quad (16)$$

Степень самовыравнивания характеризует поведение объекта регулирования без регулятора. При $\rho > 0$ кинематическое соединение обладает положительным самовыравниванием.

Как упоминалось выше, исполнительные элементы приводов на основе упругих оболочек статически устойчивы около достигнутого положения при избыточном давлении. Так, например, при перекрытии входного дросселя на некоторую величину $\Delta f_1(t)$ в упругом элементе на основе трубки Бурдона асимптотически устанавливается заданное давление, развивающее тяговый момент [1], при котором кривизна пружины равна кривизне при изменении давления до значения $P_c = P_{c0}$. При $\rho < 0$ кинематическое соединение обладает отрицательным самовыравниванием. При изменении сече-

ния $\Delta f_1(t)$ дросселя происходит увеличение давления до тех пор, пока оно не достигнет значения P_1 . В этом случае обеспечить устойчивую работу кинематического соединения невозможно. Если $\rho = 0$, то кинематическое соединение обладает нулевым самовыравниванием. Обеспечить нормальную работу пружины без регулятора также невозможно.

В пружине с избыточным давлением в полости параметр ρ будет всегда положителен, если $P_2 = P_{атм}$. Как упоминалось выше, координаты и, следовательно, перемещение λ являются функциями избыточного давления в полости пружины. Отклонение от номинальных координат вследствие приложения внешней нагрузки приводит к деформации пружины и к изменению внутреннего текущего давления, значение которого получено на основе уравнений газа переменной массы в работе [4]:

$$P_v = P_{c0} \left(\frac{V_{c0}}{V_v} \right)^i \left(\frac{G_v}{G_{c0}} \right)^j, \quad (17)$$

где V_{c0} , G_{c0} — объем и масса воздуха в основном объеме в положении равновесия; V_v , G_v — текущий объем и масса газа; i, j — коэффициенты политропы. Для пневмоэлементов получены следующие значения коэффициентов политропы: $i = 1,3, j = 1,15$ [4].

Построение алгоритма управления движением системы "механизм кисти—пневмопривод"

Синтезируем алгоритм управления силой сжатия в предположении, что контур организуется на основе обратных связей по усилиям, измеряемым тензометрическими или пьезоэлектрическими датчиками. Упомянутое выше отклонение подвижной точки упругого приводного элемента необходимо скомпенсировать дополнительным давлением, устраняющим смещение от номинального положения. Таким образом, возникает необходимость проектирования кинематического соединения со свойствами следящего пневмопривода, обеспечивающего решение проблемы позиционирования звеньев протеза. Используемые параметры воздуха настолько ухудшают динамические характеристики, что до настоящего времени подобное решение на основе пневмопривода является технической проблемой. В частности, коэффициент демпфирования пневмопривода существенно меньше единицы, что указывает на высокую колебательность, однако путем введения гибкой обратной связи по нагрузке (что обеспечивает упругий приводной элемент) можно увеличить коэффициент демпфирования.

Модель механической части протеза как объекта управления

Модель механической части протеза как объекта управления представим следующим образом. Реакция (1), которая возникает ответно на внешнюю нагрузку, приводится к точке перемещения упругого элемента и является функцией расхода ΔG газа, поступившего в полость оболочки, и перемещения λ ее

подвижной точки. Считаем, что масса подвижных звеньев протеза имеет сосредоточенный характер и размещена в середине каждого звена. Каждый палец протеза имеет одну степень подвижности $W = 1$. Приведем массы и моменты инерции звеньев пальца протеза к подвижной части упругого элемента. Тогда модель силового взаимодействия звена протеза с неподвижным объектом манипулирования принимаем в виде зависимости между компенсирующей силой (реакцией) на упругом элементе с приведенными к нему инерционными, диссипативными, потенциальными силовыми характеристиками и внешним воздействием, вызывающим реакцию, т. е.

$$R(\lambda, \Delta G) = \sum_{i=1}^n N_i, \quad (18)$$

где $R(\lambda, \Delta G)$ — реакция, вызванная внешним воздействием; $\sum_{i=1}^n N_i$ — сумма сил, действующих на упругое соединение. Индекс i относится к номеру канала, по которому выполняется заявка на выдачу газа.

С учетом (1) равенство (18) можно записать в виде

$$(F_0 + \Delta F)(\Delta P) = m_n \ddot{\lambda} + \alpha \dot{\lambda} + \sum_{i=1}^n N_i. \quad (19)$$

Здесь $m_n \ddot{\lambda}$ — сила преодоления инерционности приведенной массы звена протеза (m_n); $\alpha \dot{\lambda}$ — величина, учитывающая демпфирование; $\sum_{i=1}^n N_i = N_H + cx$ — постоянная нагрузка и упругая начальная сила пружины.

Управляемой переменной является перемещение точки приведения на пружине λ , в роли управляющей переменной выступает давление ΔP в полости пружины. Задача синтеза алгоритма управления сводится к определению структуры и параметров закона вычисления управляющей функции, при которых привод развивает заданное усилие сжатия (реакции), пропорциональное перемещению точки приведения управляемого упругого кинематического соединения [9]. Алгоритмы с такими свойствами можно синтезировать по методу обратных задач динамики в сочетании с принципами управления по ускорению [10].

Задачу формулируем следующим образом: найти структуру и параметры закона формирования управляющей функции $\Delta P = \Delta P(\lambda, \dot{\lambda})$ из условия, чтобы переходный процесс установления заданного перемещения $\lambda(t) \rightarrow \lambda^0$ с требуемой степенью приближения следовал за решением дифференциального уравнения

$$\begin{aligned} \tau_\lambda^2 \ddot{\lambda}^*(t) + 2\varepsilon \tau_\lambda \dot{\lambda}^*(t) + \lambda^*(t) &= \lambda^0; \\ \lambda^*(0) = \lambda^0; \dot{\lambda}^*(0) &= \dot{\lambda}^0, \end{aligned} \quad (20)$$

где λ^0 — требуемое (точное) перемещение подвижной части упругого элемента.

Уравнение управляемого процесса запишем в следующем виде:

$$\ddot{\lambda}^*(t) = \ddot{\lambda}(t). \quad (21)$$

Здесь функция $\ddot{\lambda}(t) = F = b\Delta P - \beta_1 \dot{\lambda} - \beta_0 \lambda$, где b, β_1, β_2 — параметры подвижных частей протеза, полученных из формулы (19), причем $\beta_1 = \frac{\alpha}{m_n}$,

$$\beta_0 = \frac{C}{m_n}, b = \frac{F_0 + \Delta F}{m_n}.$$

В соответствии с методом решения обратных задач динамики искомый алгоритм определяется из условия, чтобы ускорение перемещения

$$\ddot{\lambda}(t) = b\Delta P - \beta_0 \lambda(t) - \beta_1 \dot{\lambda}(t)$$

было равно ускорению

$$\ddot{\lambda}^*(t) = \frac{1}{2}(\lambda^0 - \lambda^*(t)) - 2\frac{\varepsilon}{\tau_\lambda} \dot{\lambda}(t),$$

где требуемое ускорение

$$F^*(\lambda, \dot{\lambda}) = \frac{1}{2}(\lambda^0 - \lambda^*(t)) - 2\frac{\varepsilon}{\tau_\lambda} \dot{\lambda}(t) \quad (22)$$

соответствует эталонному процессу $\lambda(t) \rightarrow \lambda^0$. Сравнивая $\ddot{\lambda}^*(t) = \ddot{\lambda}(t)$, найдем

$$\Delta P(\lambda, \dot{\lambda}) = \frac{1}{b} \left[\frac{1}{2}(\lambda^0 - \lambda) + \beta_0 \lambda + \left(\beta_1 - 2\frac{\varepsilon}{\tau_\lambda} \right) \dot{\lambda} \right]. \quad (23)$$

Управляющая функция (23) имеет две составляющие. Первая из них

$$\Delta P_1(\lambda, \dot{\lambda}) = \frac{1}{b} [\beta_0 \lambda + \beta_1 \dot{\lambda}]. \quad (24)$$

Вторая составляющая

$$\Delta P_2(\lambda, \dot{\lambda}) = \frac{1}{b} \left[\frac{1}{2}(\lambda^0 - \lambda) - 2\frac{\varepsilon}{\tau_\lambda} \dot{\lambda} \right]. \quad (25)$$

Первая составляющая выполняет роль компенсирующего сигнала, который компенсирует те движения, которые не соответствуют заданному закону изменения $\lambda(t)$. Вторая составляющая придает скомпенсированному объекту требуемые динамические свойства, которые отвечают назначенному характеру процесса $\lambda(t) \rightarrow \lambda^0$ в соответствии с уравнением (20).

Заключение

Предложена система управления протезом руки с человеком в контуре управления, что обеспечивает выполнение высокоманевренных операций в сложных и изменяющихся во времени условиях. Пульт управления вынесен на стопу оператора и представляет собой пульт-стельку с контактными датчиками, принимающими сигналы оператора. Основным преимуществом предлагаемого метода управления является тот факт, что он не требует сложного и дорогостоящего оборудования и, соответственно, больших затрат на его эксплуатацию.

Предложена кинематическая схема протеза с самоустанавливающимся механизмом предплечья с пневмоприводом на основе тонкостенных управляемых оболочек.

Проведен динамический анализ статической устойчивости поддержания постоянного давления в ресивере, на основании которого установлена положительная устойчивость, исключая использование в системе управления уровнем давления ПИД регулятора.

Синтезирован компенсационный алгоритм управления подвижными элементами протеза с возможностью его использования в условиях, когда управляемая система может обладать незнакомого оператору внутренней моделью.

Список литературы

1. **Андреева Л. Е.** Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1981.
2. **Воробьев Е. И.** Оптимизация быстродействия пневматического манипулятора выбором моментов переключения приводов // *Машиноведение*. 1987. № 3. С. 8—12.
3. **Елисеев С. В., Кузнецов Н. К., Лукьянов А. В.** Управление колебаниями роботов. М.: Наука, 1990.
4. **Мамонтов М. А.** Основы термодинамики тел переменной массы. Тула: Приокское книжное издательство, 1970. 86 с.

5. **Чижиков В. И.** Кинематика манипулятора с трубчатыми упругими звеньями постоянной кривизны главной оси // *Математическое моделирование и управление в сложных системах*. Вып. 9 / Под общей ред. А. П. Хныкина. М.: МГУПИ, 2006. С. 137—144.

6. **Чижиков В. И.** Тормозное устройство на основе трубки Бурдона в следящем пневмоприводе // *Промышленные АСУ и контроллеры*. Математическое обеспечение АСУ. 2011. № 7. С. 30—38.

7. **Чижиков В. И.** Теоретические основы проектирования исполнительной системы мобильных роботов с управляемой деформацией упругих звеньев и упругих кинематических соединений // *Всерос. науч.-техн. фестиваль молодежи имени профессора Е. А. Девянина "Мобильные роботы и мехатронные системы"*. Матер. науч. школы-конф. Москва, 24—29 марта 2008. Изд. МГУ, 2009. 117 с.

8. **Воробьев Е. И., Чижиков В. И., Моргуненко К. О.** Протез кисти с пневмоприводом и адаптацией к форме захватываемого объекта // *Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики*. 2014. № 50. С. 16—32.

9. **Крутько П. Д.** Управление исполнительными системами роботов. М.: Наука, 1991. 336 с.

10. **Востриков А. С.** Синтез систем регулирования методом локализации. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2007.

11. **Fleischer C., Wege A., Kondak K., Hommel G.** Application of EMG signals for controlling exoskeleton robots // *Biomed Tech (Berl)*. 2006. Dec; 51 (5—6): 314—9.

12. **Kuiken T. A., Li G., Lock B. A., Lipschutz R. D., Miller L. A., Stubblefield K. A., Englehart K. B.** Targeted Muscle reinnervation for real-time myoelectric control of multifunction artificial arms. *JAMA*. 2009. Feb 11; 301 (6): 619—28.

E. I. Vorob'yov, Professor, **V. I. Chizhikov**, Associate Professor, vichizhikov@gmail.com, **A. V. Mikheyev**, Junior researcher, Moscow State University Instrument Making and Informatics

Development of Models and Control Algorithms Mobile Elements of a Pneumatic Actuator Limb of a Hand

The solution of a problem of off-line adaptive control is considered by an artificial limb, thus it is meant that the operated system can possess to the operator internal model. The control panel is taken out on foot of the operator and represents the panel insole with the contact sensors, accepting signals of the operator, the Main advantage of an offered method of management is that he doesn't demand the difficult and expensive equipment and, respectively, costs of its operation. The analytical assessment of static stability of the pneumoaccumulator as artificial limb power source is stated. The kinematic scheme of an artificial limb with self-established mechanism of a forearm with a pneumatic actuator on the basis of thin-walled operated covers is offered. The compensation algorithm of management by mobile elements of an artificial limb with possibility of its use in conditions when the operated system can possess to the unfamiliar operator internal model is synthesized.

Keywords: artificial limb, management, pneumoaccumulator, pattern, static stability, adaptability element

References

1. **Andreeva L. E.** Uprugie elementy priborov. M.: Mashinostroyeniye, 1981.
2. **Vorob'ev E. I.** Optimizatsiya bystrodeystviya pnevmaticheskogo manipulyatora vyborom momentov pereklyucheniya privodov. *Машиноведение*. 1987. N. 3. P. 8—12.
3. **Eliseev S. V., Kuznetsov N. K., Luk'yanov A. V.** Upravlenie kolebaniyami robotov. M.: Nauka, 1990.
4. **Mamontov M. A.** Osnovy termodinamiki tel peremennoy massy. Tula: Priokskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1970. 86 p.
5. **Chizhikov V. I.** Kinematika manipulyatora s trubchatymi uprugimi zven'yami postoyannoy krivizny glavnoy osi. Pod obshchey red. A. P. Khnykina. *Matematicheskoe modelirovanie i upravlenie v slozhnykh sistemakh*. Iss. 9. M.: MGUPI, 2006. P. 137—144.
6. **Chizhikov V. I.** Tormoznoye ustroystvo na osnove trubki Burdona v sledyashchem pnevmoprиводе. *Промышленные АСУ и контроллеры*. *Matematicheskoe obespechenie ASU*. 2011. N. 7. P. 30—38.
7. **Chizhikov V. I.** Teoreticheskie osnovy proektirovaniya ispolnitel'noy sistemy mobil'nykh robotov s upravlyаемoy deformatsiey up-

rugikh zven'ev i uprugikh kinematicheskikh soedineniy. *Vseross. nauch.-tekhn. festival' molodezhi imeni professora E. A. Devyanina "Mobil'nye roboty i mekhatronnye sistemy"*. Mатер. nauch. shkoly-konf. Moskva, 24—29 marta 2008. Izd. MGU, 2009. 117 p.

8. **Vorob'ev E. I., Chizhikov V. I., Morgunenko K. O.** Protez kisti s pnevmoprиводом i adaptatsiey k forme zakhvatываемого ob'ekta. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta priborostroyeniya i informatiki*. 2014. N. 50. P. 16—32.

9. **Krut'ko P. D.** Upravlenie ispolnitel'nymi sistemami robotov. M.: Nauka, 1991. 336 p.

10. **Vostrikov A. S.** Sintez sistem regulirovaniya metodom lokalizatsii. Novosibirsk: Izd. NGTU, 2007.

11. **Fleischer C., Wege A., Kondak K., Hommel G.** Application of EMG signals for controlling exoskeleton robots. *Biomed Tech (Berl)*. 2006. Dec; 51 (5—6): 314—9.

12. **Kuiken T. A., Li G., Lock B. A., Lipschutz R. D., Miller L. A., Stubblefield K. A., Englehart K. B.** Targeted Muscle reinnervation for real-time myoelectric control of multifunction artificial arms. *JAMA*. 2009. Feb. 11; 301 (6): 619—28.

Автоматизация проектирования стержневых экзоскелетов¹

Предложен рекуррентный метод построения дифференциальных уравнений движения стержневой механической системы типа экзоскелета в одноопорной фазе движения на основе обобщения элементов матриц в матричной форме записи уравнений. Описана алгоритмизация составления уравнений движения моделей с различным числом звеньев и, соответственно, автоматизация проектирования экзоскелетов. Новизна заключается в учете изменения длин стержней.

Ключевые слова: экзоскелет, эндоскелет, стержневая механическая система, деформируемые звенья, дифференциальные уравнения движения, матрица, индукция, рекурсия, обобщения, алгоритм

Введение

Актуальной задачей является создание стержневой системы типа экзоскелета, которая по своим механическим свойствам максимально соответствовала бы движениям опорно-двигательного аппарата человека. С конструктивной точки зрения опорно-двигательный аппарат человека является совершенным, имеет гораздо больший срок службы, чем инженерные конструкции, и является менее энергозатратным.

Большинство исследований стержневых механических систем проводится с использованием модели абсолютно твердого тела. Эти модели не являются адекватными реальному миру, а энергозатраты значительно превышают биологические прототипы. Это мешает массовому производству машин, похожих на образцы из живой природы — экзоскелетов и антропоморфных роботов [1–5].

Постановка задачи

Рассмотрим многозвенную модель экзоскелета. Для исследования плоского движения введем неподвижную правую декартову систему координат x, y с началом в точке O . Движение центра масс происходит в плоскости x, y . Система имеет все весомые звенья. Все элементы структуры являются упругими, и длины стержней являются функциями времени: $l_i = l_i(t)$ ($i = 1, \dots, n$). На рисунке схематично изображен фрагмент экзоскелета в одноопорной фазе движения, и введены соответствующие обозначения.

Пусть $A_1A_2 = l_1, A_2A_3 = l_2, \dots, A_nA_{n+1} = l_n$ — длины звеньев экзоскелета. Положение однозначно определяется углами φ_i и длинами стержней l_i ($i = 1, \dots, n$). Рассматриваемая система имеет $2n$ степеней свободы. Обозначим M_i моменты, развиваемые в i -м шарнире ($i = 1, \dots, n$). Центры масс стержней находятся в точках C_i ($i = 1, \dots, n$). Их положения будем задавать в виде отношений длины от начала соответствующего звена до центра масс ко всей длине звена через множители n_i ($i = 1, \dots, n, 0 < n_i < 1$).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-01-97512 p_центр_a).

Массы звеньев обозначим m_i ($i = 1, \dots, n$). Центральные моменты инерции звеньев относительно осей, проходящих через точки крепления перпендикулярно плоскости движения, обозначим I_i ($i = 1, \dots, n$).

Ранее нами были получены дифференциальные уравнения движения для различных моделей с фиксированным числом звеньев [6]. Приведем обобщения данных уравнений. Уравнения движения элементов n -звенной механической системы в одноопорной фазе представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений вектора угловых переменных, которые в матричной форме имеют вид

$$A(q, l)\ddot{q} + B(q, l)\dot{q} + gC(q)l + 2D(q, l)(\dot{l} \dot{q}) + E(q, l)\ddot{l} = F(q, l), \quad (1)$$

а матричное уравнение для деформаций звеньев имеет вид

$$G(q, l)\ddot{q} + H(q, l)\dot{q}^2 + gK(q) + 2L(q, l)(\dot{l} \dot{q}) + P(q, l)\ddot{l} + S(E, l) = 0, \quad (2)$$

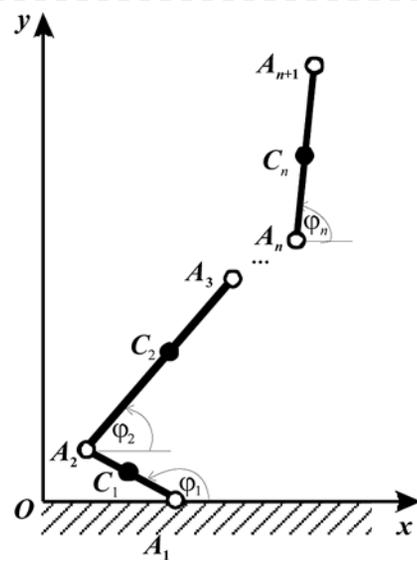


Схема кинематических звеньев n -звенного экзоскелета

где q — угловые обобщенные координаты $q = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)^T$; l — обобщенные координаты, описывающие деформации звеньев: $l = (l_1, \dots, l_n)^T$; $A(q, l)$, $G(q, l)$ — матрицы, учитывающие инерционные свойства; $B(q, l)$, $H(q, l)$ — матрицы, учитывающие вязкость; $C(q)$, $K(q)$ — матрицы, определяемые моментами силы тяжести; $D(q, l)$, $E(q, l)$, $L(q, l)$, $P(q, l)$ — матрицы, учитывающие деформации звеньев; $F(q, l)$ — матрица-столбец обобщенных сил, т. е. управляющих моментов; $S(E, l)$ — матрица-столбец, учитывающая упругие свойства материала звеньев; \ddot{q} — матрица обобщенных ускорений; \dot{q} — матрица обобщенных скоростей; $(\dot{l} \dot{q}) = (\dot{l}_1 \dot{q}_1, \dots, \dot{l}_n \dot{q}_n)^T$ — матрица, составленная из произведений $\dot{l} \dot{q}$ при равных индексах.

Установлены взаимосвязи между матрицами. Показано, что матрицы уравнения, описывающего изменения длин звеньев, связаны с матрицами уравнений, описывающих изменения углов, а именно: $G(q, l) = E(q, l)^T$, $H(q, l) = -D(q, l)^T$. В оставшихся матрицах однозначной взаимосвязи установить не удастся, но укажем их отличия и общие компоненты. Матрица K отличается от матрицы C тем, что тригонометрические функции \cos в матрице C необходимо заменить на \sin для получения матрицы K . Матрицы L и P отличаются от матриц B и D отсутствием множителей l_j и l_i ($i, j = 1, 2, 3$) соответственно.

С учетом выявленных связей между матрицами матричное уравнение для деформаций звеньев (2) окончательно можно представить в следующем виде:

$$E(q, l)^T \ddot{q} - D(q, l)^T \dot{q}^2 + gK(q) + 2L(q, l)(\dot{l} \dot{q}) + P(q, l)\dot{l} + S(E, l) = 0. \quad (3)$$

Требуется получить закономерности для рекуррентного построения матриц модели экзоскелета, состоящего из любого произвольного конечного числа звеньев.

Метод решения задачи

Обобщим по индукции полученные [6] матрицы для произвольной n -звенной системы подобного вида. Заметим, что матрицы A и D являются симметрическими, поэтому достаточно привести для них только диагональные и наддиагональные элементы (если i — номер строки, j — номер столбца, то $i, j = 1, 2, \dots, n$, при этом $j \geq i$, остальные поддиагональные элементы получают равными соответствующим симметричным относительно главной диагонали наддиагональным элементам).

Для матрицы A :

$$a_{ij} = \delta_{ij} I_i + l_i l_j \left(m_j n_j \tilde{\delta} n_i + \sum_{k=i+1}^n m_k \right) \cos(\varphi_i - \varphi_j),$$

где $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } i = j; \\ 0, & \text{при } i \neq j; \end{cases}$ $\tilde{\delta} n_i = \begin{cases} n_j, & \text{при } i = j; \\ 1, & \text{при } i \neq j. \end{cases}$

Для матрицы D :

$$d_{ij} = l_i \left(m_j n_j \tilde{\delta} n_i + \sum_{k=i+1}^n m_k \right) \cos(\varphi_i - \varphi_j),$$

где $\tilde{\delta} n_i = \begin{cases} n_j, & \text{при } i = j; \\ 1, & \text{при } i \neq j. \end{cases}$

Для матрицы P :

$$p_{ij} = \left(m_j n_j \tilde{\delta} n_i + \sum_{k=i+1}^n m_k \right) \cos(\varphi_i - \varphi_j),$$

где $\tilde{\delta} n_i = \begin{cases} n_j, & \text{при } i = j; \\ 1, & \text{при } i \neq j. \end{cases}$

Матрицы B и E являются кососимметрическими. Соответственно, элементы, стоящие на главной диагонали, равны нулю, поддиагональные элементы равны соответствующим наддиагональным элементам, взятым с противоположными знаками. Таким образом, достаточно задать только наддиагональные элементы (если i — номер строки, j — номер столбца, то $i, j = 1, 2, \dots, n$, при этом $j > i$).

Для матрицы B :

$$b_{ij} = l_i l_j \left(m_j n_j + \sum_{k=i+1}^n m_k \right) \sin(\varphi_i - \varphi_j).$$

Для матрицы E :

$$e_{ij} = -l_i \left(m_j n_j + \sum_{k=i+1}^n m_k \right) \sin(\varphi_i - \varphi_j).$$

Для матрицы L :

$$l_{ij} = \left(m_j n_j + \sum_{k=i+1}^n m_k \right) \sin(\varphi_i - \varphi_j).$$

Матрицы C и K являются диагональными, т. е. достаточно рассмотреть элементы, у которых индексы равны $j = i$, при $i, j = 1, 2, \dots, n$, остальные элементы нулевые. Достаточно использовать только один любой индекс.

Для матрицы C :

$$c_{ij} = \left(m_j n_j + \sum_{k=j+1}^n m_k \right) \cos \varphi_j.$$

Для матрицы K :

$$k_{ij} = \left(m_j n_j + \sum_{k=j+1}^n m_k \right) \sin \varphi_j.$$

Матрица-столбец обобщенных сил F имеет вид

$$f_i = M_i - M_{i+1},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Матрица-столбец S , содержащая информацию об упругих свойствах материала, имеет вид:

$$s_i = -(l_{i_0} / l_i - 1) E_i l_{i_0}^2,$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Примечание 1: во всех случаях, когда значение индекса превышает n , необходимо значение соответствующей величины положить равным нулю.

Примечание 2: в данных формулах не используется суммирование по повторяющимся индексам.

Примечание 3: матрицы для стержневой системы с разветвлением, например со второй ногой, подчиняются обобщениям, полученным для неразветвленных систем типа рассмотренной модели, но при этом необходимо изменить знаки на противоположные после перехода через точку ветвления перед соответствующими элементами матрицы.

Матричная форма записи уравнений движения (1), (3) является универсальной и может быть применена к описанию движения экзоскелета с любым числом звеньев. Структура матриц при этом останется такой же, только изменится их размерность и число масс, длин звеньев и т. п. в каждом элементе матрицы.

Для двухзвенной (снабдим ее индексом 2):

$$A_2(q, l) = \begin{pmatrix} I_1 + l_1^2 m_1 n_1^2 + l_1^2 m_2 & l_1 l_2 m_2 n_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ l_1 l_2 m_2 n_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & I_2 + l_2^2 m_2 n_2^2 \end{pmatrix}.$$

Для трехзвенной (снабдим ее индексом 3):

$$A_3(q, l) = \begin{pmatrix} I_1 + l_1^2 m_1 n_1^2 + l_1^2 m_2 + l_1^2 m_3 & l_1 l_2 (m_3 + m_2 n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & l_1 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) \\ l_1 l_2 (m_3 + m_2 n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & I_2 + l_2^2 m_2 n_2^2 + l_2^2 m_3 & l_2 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) \\ l_1 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) & l_2 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) & I_3 + l_3^2 m_3 n_3^2 \end{pmatrix}.$$

Для четырехзвенной (снабдим ее индексом 4):

$$A_4(q, l) =$$

$$\begin{pmatrix} I_1 + l_1^2 m_1 n_1^2 + l_1^2 m_2 + l_1^2 m_3 + l_1^2 m_4 & l_1 l_2 (m_3 + m_4 + m_2 n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & -l_1 l_3 (m_4 + m_3 n_3) \cos(\varphi_1 - \varphi_3) & -l_1 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_1 - \varphi_4) \\ l_1 l_2 (m_3 + m_4 + m_2 n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & I_2 + l_2^2 m_2 n_2^2 + l_2^2 m_3 + l_2^2 m_4 & -l_2 l_3 (m_4 + m_3 n_3) \cos(\varphi_2 - \varphi_3) & -l_2 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_2 - \varphi_4) \\ -l_1 l_3 (m_4 + m_3 n_3) \cos(\varphi_1 - \varphi_3) & -l_2 l_3 (m_4 + m_3 n_3) \cos(\varphi_2 - \varphi_3) & I_3 + l_3^2 m_3 n_3^2 + l_3^2 m_4 & l_3 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_3 - \varphi_4) \\ -l_1 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_1 - \varphi_4) & -l_2 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_2 - \varphi_4) & l_3 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_3 - \varphi_4) & I_4 + l_4^2 m_4 n_4^2 \end{pmatrix}.$$

Минусы в матрице для четырехзвенной механической системы связаны с тем, что в работе выше была рассмотрена модель в виде нижних конечностей антропоида с точкой ветвления, а после этой точки согласно установленной нами закономерности необходимо сменить знаки перед членами, соответствующими звеньям, находящимся выше точки ветвления. Данный факт никоим образом не влияет на общность получаемых здесь результатов.

Таким образом, матрица A_2 может быть построена следующим образом:

$$A_2 = A_1 + \delta A_1,$$

где матрицу A_1 представим в виде:

$$A_1 = \begin{pmatrix} I_1 + l_1^2 m_1 n_1^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, впервые получены обобщения для уравнений движения стержневой механической системы с деформируемыми звеньями.

Получив обобщения для матриц, построим рекурсивный алгоритм, который бы позволял по матрице для n -звенной механической системы строить матрицу для $(n + 1)$ -звенной механической системы.

Рассмотрим эту задачу на примере матрицы A для плоского случая. Для остальных матриц метод построения будет аналогичным. Также аналогично все будет выглядеть и в трехмерном случае.

Для построения метода выпишем матрицу A для однозвенной механической системы (снабдим ее индексом 1), все матрицы перепишем в более подходящем виде:

$$A_1(q, l) = I_1 + l_1^2 m_1 n_1^2.$$

Очевидно, что ее определитель равен нулю. Поэтому вклад в погрешность, связанную с уменьшением числа звеньев на единицу, она не дает.

Тогда матрица δA_1 имеет вид

$$\delta A_1 = \begin{pmatrix} l_1^2 m_2 & l_1 l_2 m_2 n_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ l_1 l_2 m_2 n_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & I_2 + l_2^2 m_2 n_2^2 \end{pmatrix}.$$

Очевидно, что ее определитель будет отличен от нуля при всех ненулевых параметрах механической системы, соответствующих реальности:

$$\begin{aligned} \det(\delta A_1) &= l_1^2 m_2 I_2 + l_1^2 l_2^2 m_2^2 n_2^2 - \\ &\quad - l_1^2 l_2^2 m_2^2 n_2^2 \cos^2(\varphi_1 - \varphi_2) = \\ &= l_1^2 m_2 I_2 + l_1^2 l_2^2 m_2^2 n_2^2 \sin^2(\varphi_1 - \varphi_2). \end{aligned}$$

Он будет являться одной из возможных оценок погрешности, связанной с уменьшением числа звеньев.

Аналогично можно представить матрицу для трехзвенной механической системы в виде

$$A_3 = A_2 + \delta A_2.$$

При этом матрица A_2 имеет вид

$$A_2 = \begin{pmatrix} I_1 + l_1^2 m_1 n_1^2 + l_1^2 m_2 & l_1 l_2 m_2 n_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & 0 \\ l_1 l_2 m_2 n_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & I_2 + l_2^2 m_2 n_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица δA_2 принимает вид

$$\delta A_2 = \begin{pmatrix} l_1^2 m_3 & l_1 l_2 m_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & l_1 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) \\ l_1 l_2 m_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & l_2^2 m_3 & l_2 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) \\ l_1 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) & l_2 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) & I_3 + l_3^2 m_3 n_3^2 \end{pmatrix}.$$

Далее строим подобным образом матрицу для четырехзвенной стержневой механической системы с деформируемыми звеньями:

$$A_4 = A_3 + \delta A_3,$$

где

$$A_3 = \begin{pmatrix} I_1 + l_1^2 m_1 n_1^2 + l_1^2 m_2 + l_1^2 m_3 & l_1 l_2 (m_3 + m_2 n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & -l_1 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) & 0 \\ l_1 l_2 (m_3 + m_2 n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & I_2 + l_2^2 m_2 n_2^2 + l_2^2 m_3 & -l_2 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) & 0 \\ -l_1 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) & -l_2 l_3 m_3 n_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) & I_3 + l_3^2 m_3 n_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\delta A_3 = \begin{pmatrix} l_1^2 m_4 & l_1 l_2 m_4 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & -l_1 l_3 m_4 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) & -l_1 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_1 - \varphi_4) \\ l_1 l_2 m_4 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & l_2^2 m_4 & -l_2 l_3 m_4 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) & -l_2 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_2 - \varphi_4) \\ -l_1 l_3 m_4 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) & -l_2 l_3 m_4 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) & l_3^2 m_4 & l_3 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_3 - \varphi_4) \\ -l_1 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_1 - \varphi_4) & -l_2 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_2 - \varphi_4) & l_3 l_4 m_4 n_4 \cos(\varphi_3 - \varphi_4) & I_4 + l_4^2 m_4 n_4^2 \end{pmatrix}.$$

Обобщим предложенный подход и рассмотрим построение матрицы для механической системы из $n + 1$ звена по матрице n -звенной механической системы.

Элементы матрицы A произвольного размера запишем, используя результаты, полученные выше.

Матрица для n -звенной механической системы имеет вид

$$A_n(q, l) = \begin{pmatrix} I_1 + l_1^2 \left(m_1 n_1^2 + \sum_{k=2}^n m_k \right) & \dots & l_1 l_j \left(m_j n_j + \sum_{k=j+1}^n m_k \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_j) & \dots & l_1 l_n m_n n_n \cos(\varphi_1 - \varphi_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_1 l_i \left(m_i n_i + \sum_{k=i+1}^n m_k \right) \cos(\varphi_i - \varphi_1) & \dots & I_i + l_i^2 \left(m_i n_i^2 + \sum_{k=i+1}^n m_k \right), (i=j) & \dots & l_i l_n m_n n_n \cos(\varphi_i - \varphi_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_1 l_n m_n n_n \cos(\varphi_1 - \varphi_n) & \dots & l_j l_n m_n n_n \cos(\varphi_j - \varphi_n) & \dots & I_n + l_n^2 m_n n_n^2 \end{pmatrix}.$$

Тогда матрица для $(n + 1)$ -звенной механической системы строится следующим образом:

$$A_{n+1} = A_n + \delta A_{n+1},$$

$$\text{где } A_n = \begin{pmatrix} I_1 + l_1^2 \left(m_1 n_1^2 + \sum_{k=2}^n m_k \right) & \dots & l_1 l_j \left(m_j n_j + \sum_{k=j+1}^n m_k \right) \cos(\varphi_i - \varphi_j) & \dots & l_1 l_n m_n n_n \cos(\varphi_1 - \varphi_n) & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_1 l_i \left(m_i n_i + \sum_{k=i+1}^n m_k \right) \cos(\varphi_i - \varphi_2) & \dots & I_i + l_i^2 \left(m_i n_i^2 + \sum_{k=i+1}^n m_k \right), (i=j) & \dots & l_i l_n m_n n_n \cos(\varphi_i - \varphi_n) & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_1 l_n m_n n_n \cos(\varphi_1 - \varphi_n) & \dots & l_j l_n m_n n_n \cos(\varphi_j - \varphi_n) & \dots & I_n + l_n^2 m_n n_n & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\delta A_n = \begin{pmatrix} l_1^2 m_{n+1} & \dots & l_1 l_j m_{n+1} \cos(\varphi_1 - \varphi_j) & \dots & l_1 l_n m_{n+1} \cos(\varphi_1 - \varphi_n) & l_1 l_{n+1} m_{n+1} n_{n+1} \cos(\varphi_1 - \varphi_{n+1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_1 l_i m_{n+1} \cos(\varphi_i - \varphi_1) & \dots & l_i^2 m_{n+1}, (i=j) & \dots & l_1 l_n m_{n+1} \cos(\varphi_1 - \varphi_n) & l_1 l_{n+1} m_{n+1} n_{n+1} \cos(\varphi_i - \varphi_{n+1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_1 l_n m_{n+1} \cos(\varphi_1 - \varphi_n) & \dots & l_j l_n m_{n+1} \cos(\varphi_j - \varphi_n) & \dots & l_n^2 m_{n+1} & l_n l_{n+1} m_{n+1} n_{n+1} \cos(\varphi_n - \varphi_{n+1}) \\ l_1 l_{n+1} m_{n+1} n_{n+1} \cos(\varphi_1 - \varphi_{n+1}) & \dots & l_j l_{n+1} m_{n+1} n_{n+1} \cos(\varphi_j - \varphi_{n+1}) & \dots & l_n l_{n+1} m_{n+1} n_{n+1} \cos(\varphi_n - \varphi_{n+1}) & l_{n+1} + l_{n+1}^2 m_{n+1} n_{n+1}^2 \end{pmatrix}.$$

Определители матриц δA_i так же, как и матрицы δA_1 , будут отличны от нуля. Они будут характеризовать погрешность, т. е. точность позиционирования и возможность совершать движения заданной сложности стержневой механической системой с деформируемыми звеньями.

Аналогичным образом будут строиться и остальные матрицы, входящие в уравнения движения. Здесь они не приводятся ввиду однотипности выполняемых действий.

Прикладная интерпретация полученных результатов исследования

Данный метод позволяет автоматизировать составление дифференциальных уравнений движения стержневой механической системы с деформируемыми звеньями типа экзоскелета напрямую, минуя трудоемкий этап применения уравнений Лагранжа и т. п. Составлять таким способом уравнения можно для модели с любым конечным числом звеньев. Данный метод открывает возможность синтеза большого числа математических моделей с различным числом звеньев, с учетом деформируемости или без него и выбора оптимальной модели исходя из практического назначения механизма.

Заключение

Получен рекуррентный алгоритм составления уравнений движения стержневой механической системы с $n + 1$ звеном по известному уравнению для n -звенной механической системы с деформируемыми звеньями. Он позволяет автоматизировать проектирование стержневых механических систем типа экзоскелета.

Список литературы

1. URL: http://vzvod.ucoz.ru/publ/ehkzoskelet_dospekhi_budshhego/1-1-0-29; дата обращения 12.04.2014.
2. URL: http://www.3dnews.ru/news/bolee_podrobnii_obzor_prototipa_ekzosk_eleta_xos_i_istoriya_ego_sozdaniya/ Дата обращения 26.01.2014.
3. Лапшин В. В. Механика и управление движением шагающих машин. М.: МГТУ. 2012, 200 с.
4. Егоров И. Н. Системы позиционно-силового управления технологическими роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 10. С. 15–20.
5. Лавровский Э. К., Письменная Е. В. Алгоритмы управления экзоскелетом нижних конечностей в режиме одноопорной ходьбы по ровной и ступенчатой поверхностям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 44–51.
6. Борисов А. В. Динамика эндо- и экзоскелета. Смоленск: Смоленская городская типография, 2012. 296 с.

A. V. Borisov, Associate professor, BorisowAndrej@yandex.ru,
The Smolensk branch of National Research University "MEI"

Automation of Designing Core Exoskeletons

In article one of variants of the decision to build the core of a mechanical system type exoskeleton, which would be in terms of mechanical properties, corresponded to the maximum movements of locomotor apparatus. The model exoskeleton with an arbitrary finite number of links. Novelty consists in changing the lengths of rods. For the first time proposed recurrent method of constructing differential equations of motion of a rod of a mechanical system type exoskeleton pillar in the movement phase. It uses a generalization of the matrix elements by induction in the matrix form of these equations. The obtained matrix notation generalizations of the equations of motion is universal and can be applied to the description of the movement of exoskeleton with any number of links. Having received generalization for matrices, built a recursive algorithm that allows by a matrix for a n-tier exoskeleton build the matrix for the n + 1-tier mechanical system. Is algorithmization compilation of equations of motion of models with different number of links and, consequently, it becomes possible to automate the design of exoskeletons. The proposed method allows to automate the preparation of the differential equations of motion of a rod of a mechanical system deformable the links of the type of exoskeleton.

Keywords: exoskeleton, endoskeleton, rod mechanical system, deformable links, the differential equation of motion, the matrix, induction, recursion, generalization, the algorithm

References

1. URL: http://vzvod.ucoz.ru/publ/ehkzoskelet_dospekhi_budshhego/1-1-0-29; data obrashcheniya 12.04.2014.
2. URL: http://www.3dnews.ru/news/bolee_podrobnii_obzor_prototipa_ekzoskeleta_xos_i_istoriya_ego_sozdaniya/ Data obrashcheniya 26.01.2014.
3. Lapshin V. V. Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagayushchikh mashin. M.: MGTU. 2012, 200 p.

4. Egorov I. N. Sistemy pozitsionno-silovogo upravleniya tekhnologicheskimi robotami. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2003. N. 10. P. 15–20.
5. Lavrovskiy E. K., Pis'mennaya E. V. Algoritmy upravleniya ekzoskeletonom nizhnikh konechnostey v rezhime odnoopornoy khod'by po rovnoy i stupenchatoy poverkhnostyam. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2014. N. 1. P. 44–51.
6. Borisov A. V. Dinamika endo- i ekzoskeleta. Smolensk: Smolenskaya gorodskaya tipografiya, 2012. 296 p.

УДК 004.942:669.018

С. М. Андреев, канд. техн. наук, доц., зав. каф., pk_su@bk.ru,

М. С. Галдин, аспирант, galdin.mike@gmail.com, МГТУ им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск

Математическая модель теплового режима валковой разливки стали

Приведена математическая модель теплового поля полосы при разливке на валковом литейно-прокатном агрегате (ВЛПА). Отличительными особенностями разработанной математической модели являются описание температурно-скоростного режима движения полосы вдоль всей длины агрегата, расчет теплового поля полосы в области разливочных валков в соответствии с законом постоянства секундных объемов разливаемого металла и учет зависимостей теплофизических свойств стали от температуры. Представлено полное математическое описание и структура разработанной модели, получены конечные формулы расчетов. Приведены результаты моделирования в виде распределения температуры по длине полосы и переходные процессы в динамических режимах работы агрегата. Предлагаемая математическая модель предназначена для использования в системах автоматического управления процессом разливки на ВЛПА.

Ключевые слова: валковая разливка стали, валковый кристаллизатор, уравнение теплопроводности, математическое моделирование, тепловой режим разливки

Особенности теплового режима валковой разливки стали

Прямое совмещение процессов литья и прокатки с использованием первородного тепла заготовки является одним из наиболее перспективных направлений развития современной металлургии. Наиболее полно данной концепции непрерывного производства отвечает валковая разливка стали.

Схема расположения оборудования на валковом литейно-прокатном агрегате (ВЛПА) представлена на рис. 1 [1]. Металл из промежуточного ковша через погружной стакан попадает в валковый кристаллизатор, на выходе из которого полоса проходит через петленакопитель горячей камеры в прокатную клетку. Далее охлаждается на участке ламинарного охлаждения и сматывается на подпольных моталках.

Специфическими преимуществами данной технологии по сравнению с традиционной являются:

- сокращение первоначальных капиталовложений;
- уменьшение себестоимости выпускаемой продукции;
- сокращение эксплуатационных расходов;
- возможность полной автоматизации процесса;
- уменьшение продолжительности производственного цикла;
- охрана природных ресурсов и экологии.

Соблюдение требуемых режимов разливки полос относится к наиболее значимым условиям получения полосы. Разработка математической модели теплового режима ВЛПА является одним из основных и важных этапов синтеза эффективной системы автоматического управления процессом разливки.

Известные модели [2–6] не предусматривают учет динамических параметров технологии валко-

вой разливки, что затрудняет их использование в системах управления процессом. Отличительной особенностью разработанной модели являются учет внутренних источников тепла, зависимости теплофизических свойств стали от температуры при использовании двухмерного шаблона явной разностной схемы, а также обеспечение условия сохранения секундных объемов в зоне кристаллизации.

В основу математической модели положено дифференциальное уравнение распространения энергии с внутренними источниками тепла, которое позволяет учитывать выделяющуюся теплоту кристаллизации [7].

Уравнение энергии при наличии внутренних источников тепла записывается в общем виде следующим образом:

$$\rho(di/d\tau) = \text{div}(\lambda \text{grad} t) + q_v, \quad (1)$$

где ρ — плотность металла; $(di/d\tau)$ — полная производная энтальпии по времени; λ — коэффициент теплопроводности металла; t — температура; q_v — плотность внутренних источников тепла.

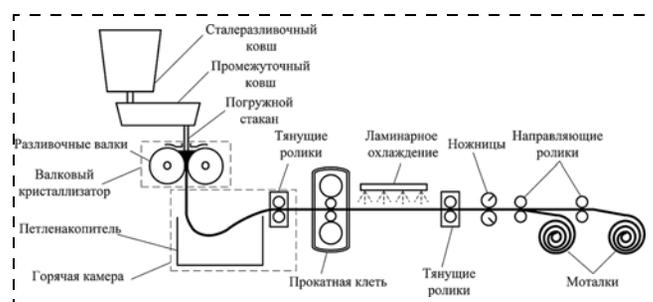


Рис. 1. Схема расположения оборудования ВЛПА

При условии неподвижной среды и при постоянных физических свойствах уравнение (1) имеет вид

$$\rho C(dt/d\tau) = \text{div}(\lambda \text{grad} t) + q_v,$$

где C — удельная теплоемкость металла.

Для учета выделяющейся теплоты кристаллизации введена величина относительного количества твердой фазы $\psi = V_{sol}/V_0$, которая по смыслу может рассматриваться как относительное количество еще не выделившегося тепла кристаллизации, V_0 и V_{sol} — соответственно объемы всего расплава и твердой фазы [7].

С введением величины ψ для кристаллизующегося слоя плотность внутреннего источника тепла равна

$$q_v = q_{cr}\rho(d\psi/d\tau),$$

где q_{cr} — скрытая теплота кристаллизации; $d\psi/d\tau$ — скорость затвердевания сплава.

Для упрощения методики решения задач затвердевания теплота кристаллизации учтена с помощью введения эффективной теплоемкости C_{eff} , которая задается в виде [8]

$$C_{eff}(t) = \begin{cases} C_{liq} & \text{при } t > t_L; \\ C(t) - q_{cr}(d\psi/dt) & \text{при } t_S < t < t_L; \\ C_{sol} = f(t) & \text{при } t_S < t, \end{cases}$$

где C_{liq} и C_{sol} — теплоемкости жидкого и твердого металла соответственно; t_L и t_S — температуры ликвидуса и солидуса соответственно.

Зависимость истинной теплоемкости от температуры для твердой стали описывается регрессионным выражением [9, 10]:

$$C_{sol}(t) = C_0 + A_1\left(\frac{t}{1000}\right)^n + A_2\exp(-A_3|t - t_0|),$$

где $C_0, A_1, A_2, A_3, t_0, n$ — постоянные коэффициенты, значения которых зависят от марки стали.

Для решения многих практических задач можно с достаточной степенью точности принять для интервала кристаллизации значение теплоемкости постоянным, определяемым как средняя величина между C_{liq} и C_{sol} [11]. Тогда значение эффективной теплоемкости в интервале температур ($t_L - t_S$) определяется как

$$C_{eff}(t) = [(C_{sol} + C_{liq})/2] + [q_{sr}/(t_L - t_S)]. \quad (2)$$

Для косвенного учета явлений гидродинамического перемешивания расплава [7] в жидкой сердцевине и явлений конвективного теплопереноса в жидкой фазе предлагается ввести понятие эффективного коэффициента теплопроводности λ_{eff} , который в интервале температур ($t_L - t_S$) задается в виде

$$\lambda_{eff} = \lambda_{sol}\psi + \lambda_{liq}(1 - \psi), \quad (3)$$

где λ_{liq} и λ_{sol} — коэффициенты теплопроводности для жидкого и твердого металла соответственно.

Зависимость теплопроводности твердой стали от температуры имеет вид [9, 10]

$$\lambda_{sol}(t) = \lambda_0 + A_1\left(\frac{t}{100}\right) - \frac{A_2}{\text{ch}(A_3[(t - t_0)/100])},$$

где $\lambda_0, A_1, A_2, A_3, t_0$ — постоянные коэффициенты, значения которых зависят от марки стали.

Аналогично предлагается представить плотность металла как функцию от температуры, введя величину ρ_{eff} , которая в интервале температур ($t_L - t_S$) определяется как

$$\rho_{eff}(t) = \rho_{sol}\psi + \rho_{liq}(1 - \psi), \quad (4)$$

где ρ_{liq} и ρ_{sol} — плотность жидкого и твердого металла соответственно.

Выразив значение эффективной теплоемкости $C_{eff}(t)$ (2), эффективной теплопроводности $\lambda_{eff}(t)$ (3) и эффективной плотности $\rho_{eff}(t)$ (4) с учетом соотношения фаз, можно окончательно записать дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в следующем виде:

$$\rho_{eff}(t)C_{eff}(t)(dt/d\tau) = \text{div}(\lambda_{eff}(t)\text{grad}(t)). \quad (5)$$

Для задания граничных условий вдоль продольной оси ЛПА можно выделить две основные зоны: кристаллизатор и горячую камеру (рис. 2). В зоне кристаллизатора учитывается теплоотдача за счет контакта полосы с водоохлаждаемыми разливочными валками. В зоне воздушного охлаждения в горячей камере учитывается теплоотдача за счет излучения, естественной и вынужденной конвекции и контакта с тянущими роликами.

Для решения задачи теплопроводности в кристаллизаторе приняты граничные условия второго рода:

$$\lambda_{eff}(t)dt/dn = -q_i, \quad (6)$$

где dn — координата поперечного сечения (соответствует dz или dy при расчете по толщине или по ширине); q_i — соответствующая i -му узлу плотность теплового потока.

При разливке стали на валковом кристаллизаторе нет необходимости подавать шлакообразующие смеси, поэтому плотность теплового потока

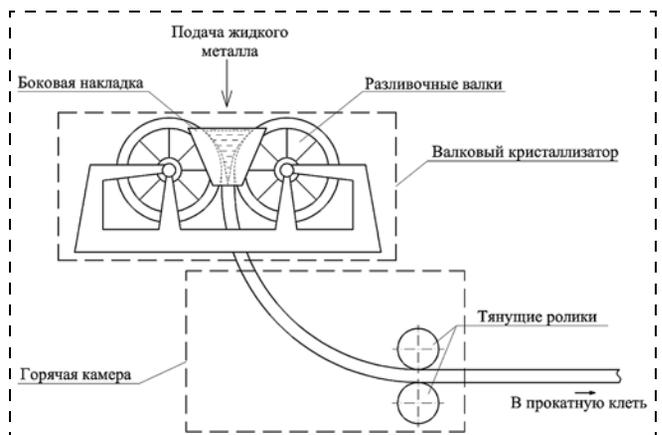


Рис. 2. Принятые при моделировании технологические зоны

определяли исходя из закона Фурье для теплообмена между медными валками кристаллизатора и разливаемой полосой:

$$q_i^{roll} = -\lambda_{Cu} \text{grad} t,$$

где $\lambda_{Cu} = 386 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ — коэффициент теплопроводности меди

$$\text{grad} t = \frac{t_{Me} - t_{H_2O}}{h_{roll}},$$

где t_{Me} , t_{H_2O} — температура полосы и температура охлаждающей воды соответственно; h_{roll} — толщина стенки валка кристаллизатора, через которую осуществляется теплопередача от металла к воде.

Аналогичным образом определяли плотность теплового потока между боковой удерживающей накладкой и разливаемой полосой:

$$q_i^{side} = -\lambda_{side} \frac{t_{Me} - t_{side}}{h_{side}},$$

где λ_{side} — коэффициент теплопроводности боковой накладки; t_{side} — температура боковой накладки со стороны контакта с воздушной средой; h_{side} — толщина боковой накладки.

Значение теплового потока в кристаллизаторе определяли с использованием уравнения теплопередачи:

$$Q_{cr} = \sum_{i=1}^n F_i q_i^{roll},$$

где F_i — площадь поверхности теплообмена для каждого узла сетки; n — число узловых точек разбиения.

Так как в кристаллизаторе происходит процесс передачи тепла от жидкого металла к охлаждающей воде, то без учета потерь можно считать, что тепловой поток, отнимаемый от слитка, равен тепловому потоку, отведенному с охлаждающей водой, который определяется по формуле

$$Q_{cr} = G_{H_2O} C_{H_2O} (t''_{H_2O} - t'_{H_2O}),$$

где G_{H_2O} — массовый расход охлаждающей воды; $C_{H_2O} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$ — удельная теплоемкость воды; t''_{H_2O} , t'_{H_2O} — конечная и начальная температуры охлаждающей воды соответственно.

Требуемая средняя температура t_{H_2O} и расход G_{H_2O} воды определяются в соответствии с тепловым балансом из уравнения

$$\sum_{i=1}^k F_i q_i^{roll} = G_{H_2O} C_{H_2O} (t''_{H_2O} - t'_{H_2O}).$$

Граничное условие в зоне воздушного охлаждения имеет вид

$$\lambda_{eff}(t) dt/dn = -(\alpha_{rad} + \alpha_{conv})(t_{Me}^{surf} - t_{inv}), \quad (7)$$

где α_{rod} , α_{conv} — соответственно коэффициенты теплоотдачи вследствие теплового излучения и конвекции; t_{Me}^{surf} — температура поверхности полосы; t_{inv} — температура окружающей среды.

Суммарный коэффициент теплоотдачи на участках горячей камеры и зоны воздушного охлаждения складывается из двух составляющих: радиационной и конвективной. Поэтому в соответствии с расчетами, представленными в работах [12, 13], суммарный коэффициент теплоотдачи при данных условиях находится по формуле

$$\alpha = \varepsilon \sigma_0 \frac{(t_{Me}^{surf})^4 - (t_{inv})^4}{t_{Me}^{surf} - t_{inv}} + 0,13 \text{Ra}^{1/3},$$

где ε — коэффициент излучающей способности; σ_0 — постоянная Стефана—Больцмана; Ra — число Рэлея.

Полученное уравнение нестационарной теплопроводности (5) вместе с условиями однозначности (6), (7) представляет собой полную формулировку математической модели процесса затвердевания непрерывнолитой полосы.

Структура модели

Для решения уравнения нестационарной теплопроводности (5) предлагается использовать разностный метод, который позволяет определить температурное поле полосы в любой момент времени в течение разливки по всей протяженности ВЛПА [14]. Структурная схема разработанной модели представлена на рис. 3.

К исходным данным, используемыми моделью в начале расчетов, относятся:

- геометрические размеры разливаемой полосы;
- марка разливаемой стали;
- уровень металла в валках кристаллизатора;
- температура металла в промежуточном ковше;
- начальный шаг расчета;
- параметры охлаждаемой воды (расход, разность температур на входе и на выходе из валков).

В отличие от разливки на традиционных машинах непрерывного литья заготовки при двухвалковой разливке форма получаемой полосы в продольном сечении по мере движения по кристаллизатору изменяется.

Для описания теплового поля полосы, получаемой при двухвалковой разливке, разностным методом необходимо провести замену непрерывных пространственных областей сечения полосы на конечную совокупность дискретно расположенных узловых точек в зависимости от размерности и типа выбранной схемы расчета. При этом расстояние между соседними точками в продольном сечении требуется определять исходя из закона сохранения секундных объемов, согласно которому объем металла, проходящий в единицу времени через определенное сечение очага деформации, формируемого

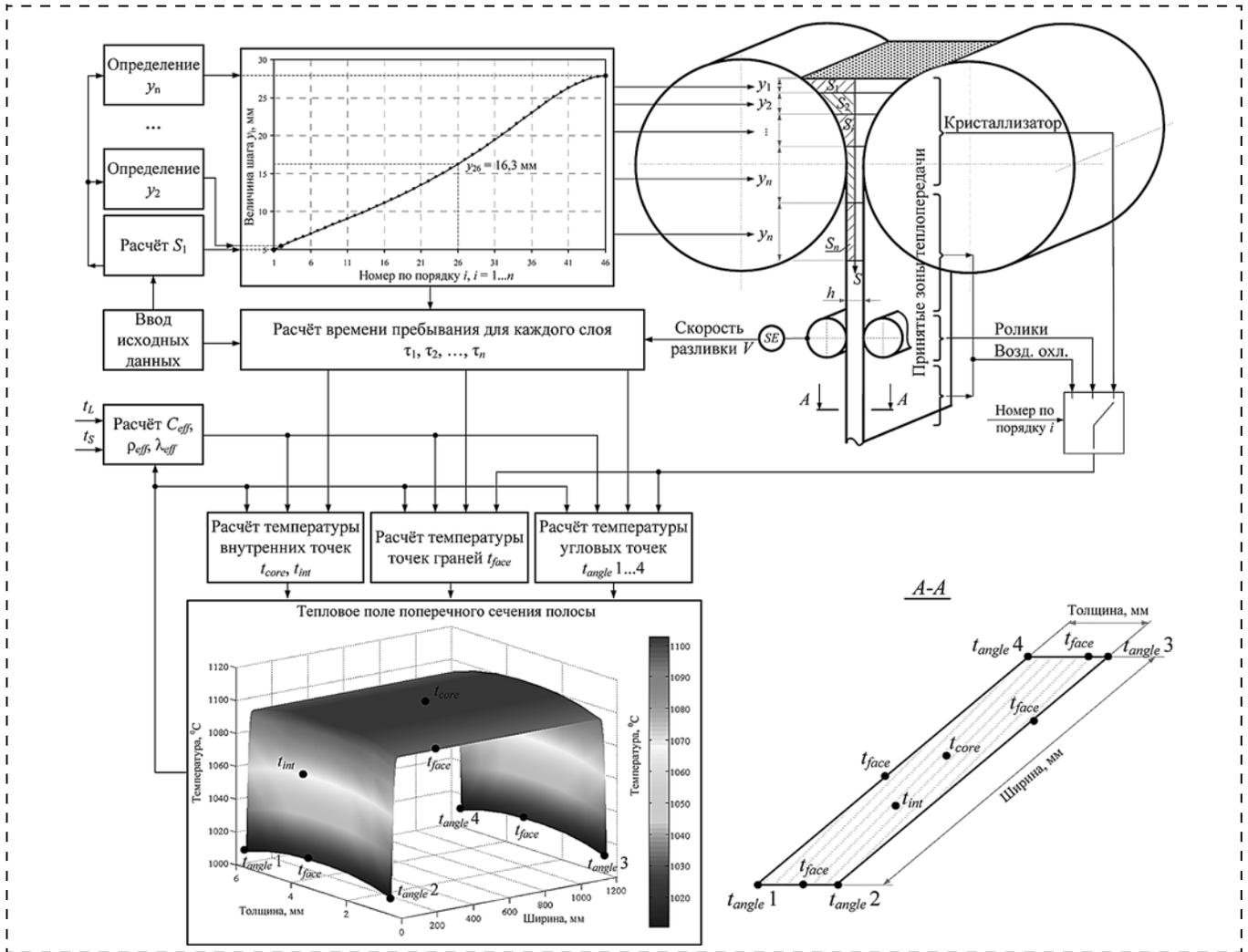


Рис. 3. Структурная схема разработанной математической модели

рабочим инструментом, не меняется при переходе от одного сечения к другому при непрерывном режиме обработки [15]. Математически закон постоянства секундных объемов выражается соотношением

$$V_i S_i = \text{const.} \quad (8)$$

Для выполнения равенства (8) необходимо, чтобы шаг дискретизации в продольном сечении полосы в кристаллизаторе обеспечивал бы постоянство объема металла, находящегося между слоями, образуемыми узловыми точками в поперечном сечении.

Поскольку ширина полосы является величиной постоянной и зависит только от размеров разливочных валков, то для постоянства объемов достаточно выполнения условия постоянства площадей образуемых слоев в продольном сечении полосы. Это сечение является симметричной фигурой, поэтому можно ограничиться рассмотрением только одной из его частей (заштрихованные области разливаемой полосы S_1, S_2, \dots, S_n на рис. 3). Для выполнения закона сохранения секундных объемов половину данного сечения требуется разбить на слои таким образом, чтобы площади S_1, S_2, \dots, S_n ,

расположенные между слоями, были равны. Для этого, зная уровень металла в валках L_{roll} , толщину полосы h и радиус валков R , необходимо задаться начальным шагом дискретизации y_1 и вычислить площадь S_1 , которая будет определять последующие шаги y_2, \dots, y_n :

$$S_1 = y_1 \left(R - \frac{h}{2} \right) - \int_{L_{roll} - y_1}^{L_{roll}} f(y) dy, \quad (9)$$

где $f(y)$ — уравнение окружности разливочного валка, имеющее вид

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2, \quad (10)$$

где x_0, y_0 — координаты центра окружности.

Решив интеграл правой части равенства (9), получаем конечную формулу для расчета S_1 :

$$S_1 = y_1 \left(R - \frac{h}{2} \right) - L_{roll} \left[\frac{1}{2} x \sqrt{R^2 - y^2} + \frac{R^2}{2} \arcsin \left(\frac{y}{R} \right) \right]. \quad (11)$$

Зная S_1 , находим шаги y_2, y_3, \dots, y_n , которые можно определять либо выражая соответствующий шаг из равенства (11), что является достаточно проблематичным, либо одним из методов одномерной оптимизации, минимизируя критерий

$$(S_1 - S_i) \rightarrow \min,$$

где i — порядковый номер шага, $i = \overline{1, n}$.

С использованием данной методики были определены значения шагов в кристаллизаторе, результаты расчета представлены в виде зависимости расчетного значения шага y_i от порядкового номера шага i (рис. 3). При вычислениях были приняты следующие исходные данные:

- радиус разливочных валков $R = 1500$ мм, что соответствует параметрам агрегата, функционирующего в г. Крефельд, Германия [16];
- уровень металла в кристаллизаторе $L_{roll} = 730$ мм;
- толщина разливаемой полосы $h = 6$ мм;
- начальный шаг расчета $y_1 = 5$ мм.

Поскольку уравнение окружности (10) относится к кривым второго порядка, то полученная зависимость шага от уровня металла в валках является нелинейной.

Далее по найденным значениям шагов y_i рассчитывается время пребывания каждого слоя $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, которые передаются в блоки расчета температур характерных узловых точек (угловые, внутренние точки и точки поверхности).

Температуры рассчитываются разностным методом в соответствии с условиями теплопередачи и эффективными значениями теплотехнических коэффициентов разливаемой стали [17]. Условия теплопередачи определяются в зависимости от расположения сечения по отношению к принятым зонам теплопередачи.

Результаты моделирования

С помощью разработанной математической модели было выполнено математическое моделирование температурно-скоростного режима разливки полосы. Реализация модели проводилась с использованием разностных схем на языке программирования высокого уровня, с учетом требований к режимам в реальном масштабе времени. Рассчитанное тепловое поле полосы вдоль технологической линии ВЛПА до прокатной клетки при скорости разливки 70 м/мин изображено на рис. 4, тепловое поле полосы в зоне разливочных валков представлено на рис. 5. Параметры агрегата, а также параметры разливки перечислены выше. Суммарный коэффициент теплоотдачи на участках воздушного охлаждения $\alpha = 230$ Вт/(м²·К), рассчитанная плотность теплового потока в валках кристаллизатора изменялась от 10 до 30 МВт/м².

Среди параметров управления технологическим процессом непрерывной разливки стали на валковых агрегатах наибольшее внимание необходимо уделять скорости разливки, определяющей тепловой

режим работы всей производственной линии [17]. Поэтому наиболее полезны с точки зрения управления подобными агрегатами переходные процессы динамики изменения температурного поля полосы, возникающие при изменениях скорости разливки-прокатки.

При моделировании за базовую скорость была принята скорость 70 м/мин. Фиксировали температуры металла в характерных точках поперечного сечения (центра ($t_{ц}$), середины узкой ($t_{с.уз}$) и широкой ($t_{с.шир}$) граней и ребра (t_p)) на расстоянии 1, 3 и 7 м (см. точки A, B и C на рис. 4) от мениска металла в валках-кристаллизаторах при изменении скорости разливки с 70 м/мин до 80 м/мин, 90 м/мин и 100 м/мин. Полученные результаты представлены на рис. 6, 7 и 8 для сечений полосы на расстоянии 1, 3 и 7 м (точки A, B и C на рис. 4) от мениска соответственно.

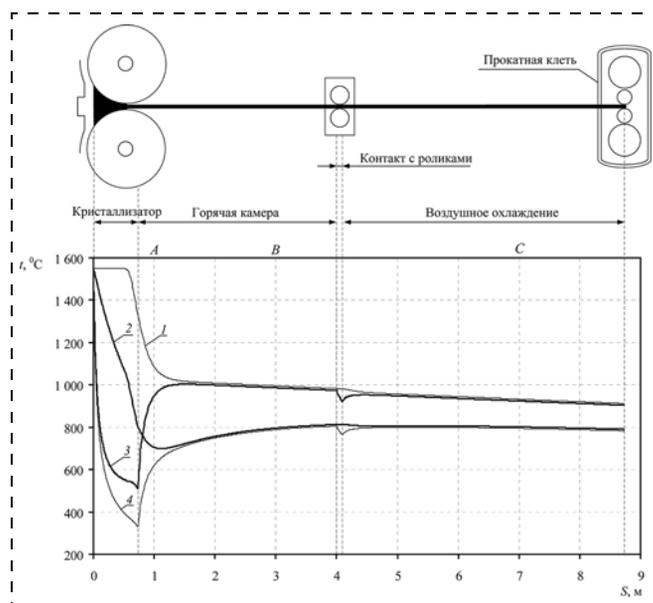


Рис. 4. Температурное поле непрерывнолитой полосы, скорость разливки 70 м/мин:
1 — температура центра; 2 — температура центра узкой грани; 3 — температура центра широкой грани; 4 — температура ребра

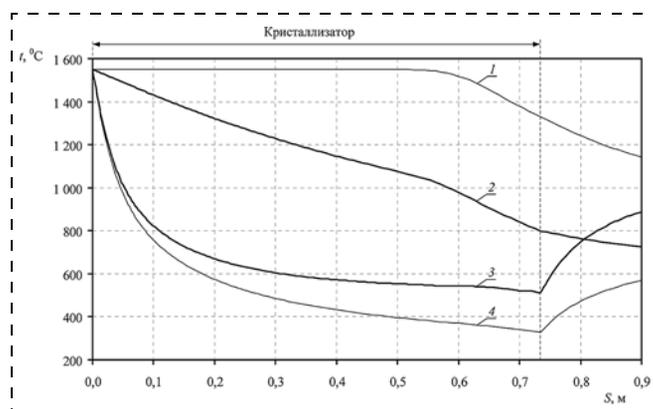


Рис. 5. Температурное поле непрерывнолитой полосы в зоне валков кристаллизатора:
1 — температура центра; 2 — температура центра узкой грани; 3 — температура центра широкой грани; 4 — температура ребра

На расстоянии 1 и 3 м от уровня металла в валках при изменении скорости разливки динамика температур центра широкой грани и ребра схода. При увеличении скорости разливки в начальный момент времени наблюдается понижение температуры вследствие уменьшения степени разогрева, далее этот эффект компенсируется следующими слоями с новыми температурными распределениями, температура начинает повышаться до тех пор, пока не придет металл, который изначально разливался при новых условиях. После этого переходный процесс завершается.

На расстоянии 7 м вид переходных процессов всех точек сжог, поскольку в данном сечении наблюдается динамика уменьшения среднemasсовой температуры вследствие охлаждения на воздушном участке. При этом основное изменение приходится на тот момент, когда к данному сечению приходят точки из кристаллизатора, разливаемые с новой измененной скоростью.

Заключение

Исследование модели теплового режима разливки показало, что предложенный вид и структура модели обеспечивают высокую точность поведения модели в динамических режимах работы агрегата, что позволяет использовать данную модель при построении автоматизированных систем управления.

Численная реализация модели с использованием разностных схем обеспечивает расчет в реальном масштабе времени.

Список литературы

1. Killmore C. R., Creely H., Phillips A., Kaul H. Development of ultra thin cast strip products by the Castrip process // Materials forum. 2008. V. 32. P. 13–28.
2. Kloss W. Duennbandgiessen mit variablem Giessspalt. Umformtechnische Schriften. Aachen: Shaker Verlag, 2005. Band 144. 179 p.

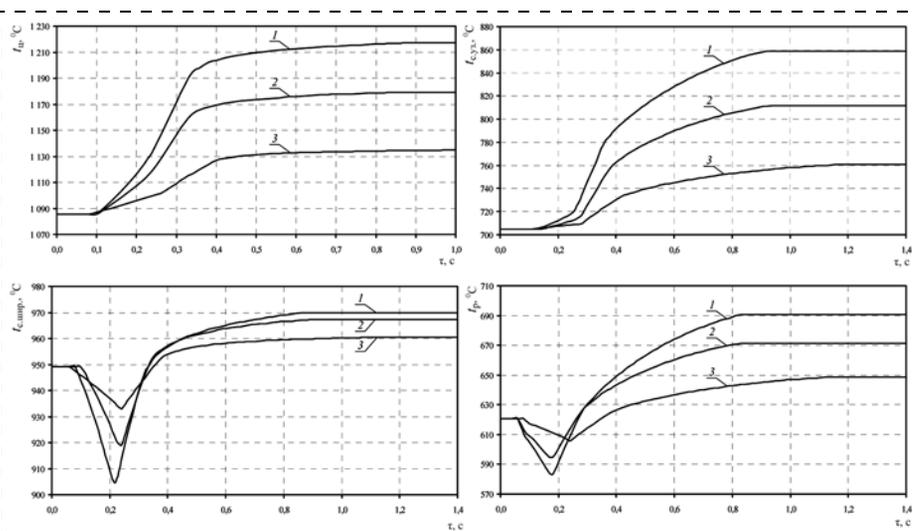


Рис. 6. Переходные процессы на расстоянии 1 м от мениска в валках кристаллизатора: 1 — конечная скорость 100 м/мин; 2 — конечная скорость 90 м/мин; 3 — конечная скорость 80 м/мин

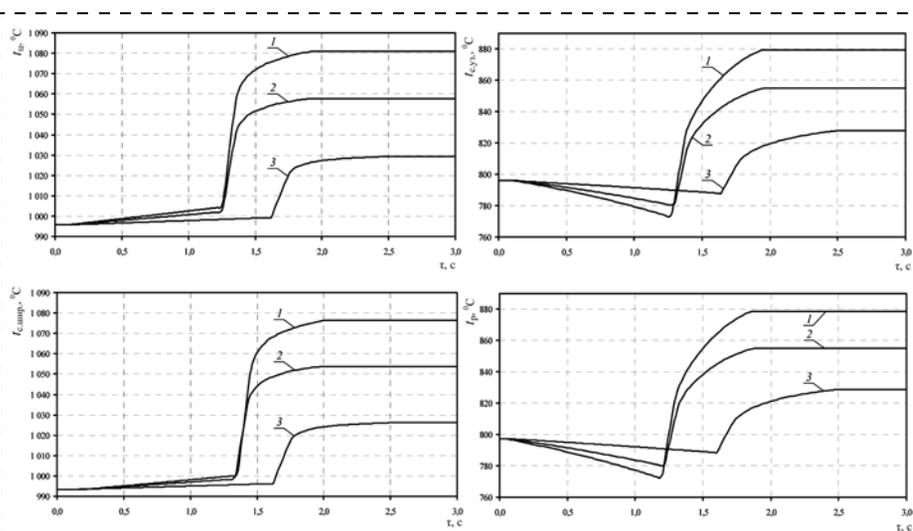


Рис. 7. Переходные процессы на расстоянии 3 м от мениска в валках кристаллизатора: 1 — конечная скорость 100 м/мин; 2 — конечная скорость 90 м/мин; 3 — конечная скорость 80 м/мин

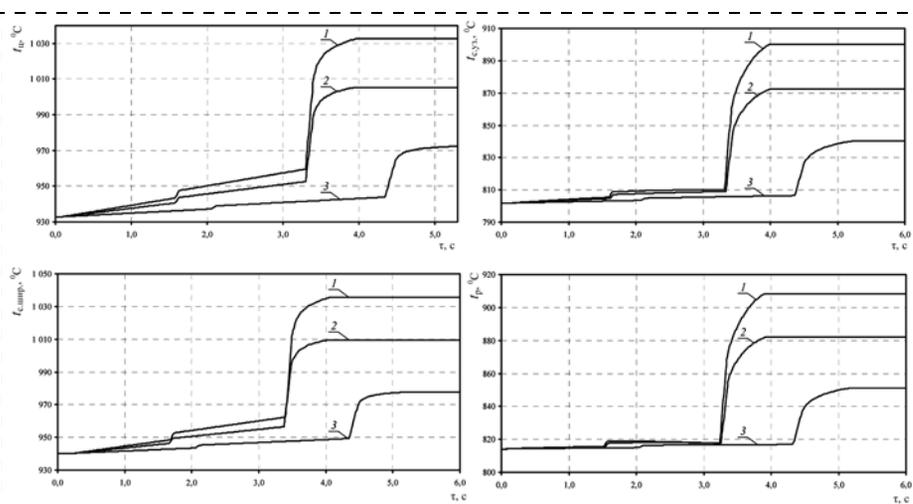


Рис. 8. Переходные процессы на расстоянии 7 м от мениска в валках кристаллизатора: 1 — конечная скорость 100 м/мин; 2 — конечная скорость 90 м/мин; 3 — конечная скорость 80 м/мин

3. Santos C. A., Spim J. A., Garcia A. Modelling of solidification in twin-roll strip casting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2000. № 102 (1–3). P. 33–39.
4. Zhang X. M., Jiang Z. Y., Liu X. H., Wang G. D. Modelling of the micro-segregation of twin-roll thin strip casting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. № 162–163. P. 591–595.
5. Зиновьев А. В., Савченко В. С., Бондаренко А. А. Моделирование процесса непрерывного литья тонких полос в валковом кристаллизаторе // *Сучасні проблеми металургії*. Наукові вісті. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: "Системні технології". 2005. Т. 8. С. 32–36.
6. Гридин А. Ю. Математическое моделирование температурного поля металла и валков в процессе валковой разливки-прокатки // *Обработка материалов давлением*. 2009. № 1 (20). С. 75–83.
7. Емельянов В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. М.: Металлургия, 1988. 143 с.
8. Батраева А. Е., Парсункин Б. Н., Ишметьев Е. Н., Андреев С. М., Салихов З. Г., Светлов А. Ю. Динамическое управление температурным состоянием заготовок МНЛЗ // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2007. № 11. С. 20–25.
9. Галдин М. С., Андреев С. М. Определение коэффициентов аналитических зависимостей теплофизических свойств стали от температуры // *Автоматизированные технологии и производство*. 2012. № 4. С. 118–126.
10. Маковский В. А., Лаврентик И. И. Алгоритмы управления нагревательными печами. М.: Металлургия, 1977. 183 с.
11. Лисин В. С., Селянинов А. А. Модели и алгоритмы расчета термомеханических характеристик совмещенных литейно-прокатных процессов. М.: Высшая школа, 1995. 144 с.
12. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 397 с.
13. Варенцов А. А. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около вертикального цилиндра методом имитационного моделирования. Иваново: Изд. ГОУ ВПО "ИГЭУ", 2004. 32 с.
14. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов и др. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
15. Целиков А. И., Гришков А. И. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1970. 358 с.
16. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Справ. изд. в 2-х кн. Кн. 1. Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008. 640 с.
17. Галдин М. С., Андреев С. М. Исследование теплового режима разливки непрерывнолитых полос по математической модели процесса на валковом литейно-прокатном агрегате // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. Иркутск: ГОУ ВПО "ИРГУ". 2013. № 2. С. 52–57.

S. M. Andreev, Head of chair, pk_su@bk.ru, M. S. Galdin, Postgraduate student, galdin.mike@gmail.com, Nosov Magnitogorsk State Technical University

Mathematical Model of Thermal Mode of Twin-Roll Strip Casting

The paper considers the mathematical model of the strip thermal field at the twin-roll strip casting machine. Distinctive features of the developed mathematical model are description temperature-speed mode of the casting along the unit's length, calculation of the thermal field in the strip casting rolls providing the condition of constant volume and dependence of the steel physical properties from strip's temperature. Full mathematical description and structure of the developed model are presented. The final formulas for calculating the thermal field of casting strip are received. The form of the temperature distribution along the length of the strip and transients in the dynamic conditions of the unit are described as the results of simulation. The proposed mathematical model is designed for use in automated control systems at the twin-roll strip casting machine.

Keywords: twin-roll strip casting, twin-roll mold, equation of thermal conductivity, mathematic modeling, thermal mode of casting

References

1. Killmore C. R., Creely H., Phillips A., Kaul H. Development of ultra thin cast strip products by the Castrip process. *Materials forum*. 2008. V. 32. P. 13–28.
2. Kloss W. Duennbandgiessen mit variablem Giessspalt. Urnformtechnische Schriften. Aachen: Shaker Verlag, 2005. Band 144. 179 p.
3. Santos C. A., Spim J. A., Garcia A. Modelling of solidification in twin-roll strip casting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000. N. 102 (1–3). P. 33–39.
4. Zhang X. M., Jiang Z. Y., Liu X. H., Wang G. D. Modelling of the micro-segregation of twin-roll thin strip casting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. N. 162–163. P. 591–595.
5. Zinov'ev A. V., Savchenko V. S., Bondarenko A. A. Modelirovanie protsessa nepreryvnogo lit'ya tonkikh polos v valkovom kristallizatore. *Suchasni problemi metalurgii. Naukovi visti. Plastichna deformatsiya metaliv*. Dnipropetrovs'k: "Sistemni tekhnologii". 2005. Iss. 8. P. 32–36.
6. Gridin A. Yu. Matematicheskoe modelirovanie temperaturnogo polya metalla i valkov v protsesse valkovoy razlivki-prokatki. *Obrabotka materialov davleniem*. 2009. N. 1 (20). P. 75–83.
7. Emel'yanov V. A. Teplovaya rabota mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok. М.: Metallurgiya, 1988. 143 p.
8. Batraeva A. E., Parsunkin B. N., Ishmet'ev E. N., Andreev S. M., Salikhov Z. G., Svetlov A. Yu. Dinamicheskoe upravlenie temperaturnym sostoyaniem zagotovok MNLZ. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy*. Chernaya metallurgiya. 2007. N. 11. P. 20–25.
9. Galdin M. S., Andreev S. M. Opredelenie koeffitsientov analitycheskikh zavisimostey teplofizicheskikh svoystv stali ot temperatury. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva*. 2012. N. 4. P. 118–126.
10. Makovskiy V. A., Lavrentik I. I. Algoritmy upravleniya nagrevatel'nymi pechami. М.: Metallurgiya, 1977. 183 p.
11. Lisin V. S., Selyaninov A. A. Modeli i algoritmy rascheta termomekhanicheskikh kharakteristik sovmeshchennykh liteynoprokatnykh protsessov. М.: Vysshaya shkola, 1995. 144 p.
12. Kutateladze S. S. Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie. М.: Energoatomizdat, 1990. 397 p.
13. Varentsov A. A. Issledovanie teplootdachi pri estestvennoy konveksii okolo vertikal'nogo tsilindra metodom imitatsionnogo modelirovaniya. Иваново: Изд. ГОУ ВПО "ИГЭУ", 2004. 32 p.
14. Matematicheskoe modelirovanie teplovoy raboty promyshlennykh pechey / V. A. Arutyunov i dr. М.: Metallurgiya, 1990. 239 p.
15. Tselikov A. I., Grishkov A. I. Teoriya prokatki. М.: Metallurgiya, 1970. 358 p.
16. Konovalov Yu. V. Spravochnik prokatchika. Sprav. izd. v 2-kh kn. Kn. 1. Proizvodstvo goryachekatanykh listov i polos. М.: Teplotekhnika, 2008. 640 p.
17. Galdin M. S., Andreev S. M. Issledovanie teplovogo rezhima razlivki nepreryvnolytikh polos po matematicheskoy modeli protsessa na valkovom liteynoprokatnom aggregate. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Irkutsk: ГОУ ВПО "ИРГУ". 2013. N. 2. P. 52–57.

Комплексирование методов математического моделирования химико-технологического процесса в колонне синтеза аммиака

Рассмотрен метод математического моделирования, сочетающий различное описание для физических и химических процессов. Описание физических процессов осуществлено через типовые формулы. Для описания химических процессов в колонне синтеза применены формулы, определяемые в результате регрессионного анализа натуральных данных, полученных в ходе проведения активного эксперимента.

Ключевые слова: разработка интеллектуальной системы управления, экспертная база знаний, математическое моделирование химико-технологического процесса синтеза аммиака

Введение

Применение математического моделирования в системах управления позволяет при минимальных затратах оптимизировать режимы и осуществлять межрежимные переходы на промышленных объектах без риска аварийных происшествий. В данной работе рассматриваются вопросы разработки математической модели химико-технологического процесса, протекающего в трехполочной колонне синтеза аммиака (рис. 1). Как видно из рис. 1, данная колонна является сложным технологическим объектом, имеющим внутренние обратные связи (рециклы). Использование математической модели данного объекта позволит в значительной степени повысить эффективность управления процессом синтеза аммиака, а также снизить вероятность реализации интеллектуальной управляющей системой ошибочных действий.

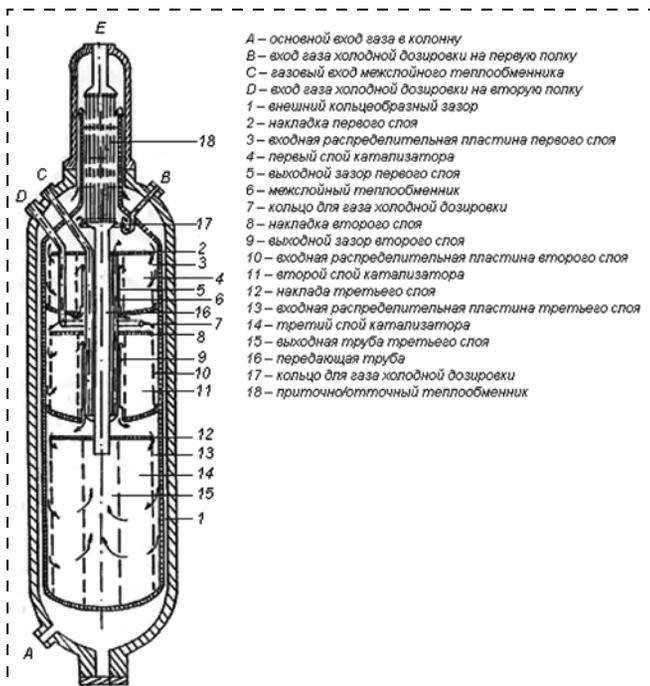


Рис. 1. Трехполочная колонна синтеза аммиака, проект фирмы "Ammonia Casale" [1]

Задачи исследования

Исследование направлено на решение следующих задач:

- комплексирование методов построения математической модели при решении задачи прогнозирования управляющих воздействий для объекта химической промышленности;
- проверка достоверности данных, используемых при регрессионном анализе;
- определение критериев проведения активного эксперимента для получения необходимых данных об объекте исследования.

Построение математической модели колонны синтеза аммиака

Для изображенной на рис. 1 колонны синтеза аммиака распределение материальных потоков может быть представлено в виде схемы, показанной на рис. 2. В колонне синтеза аммиака происходят

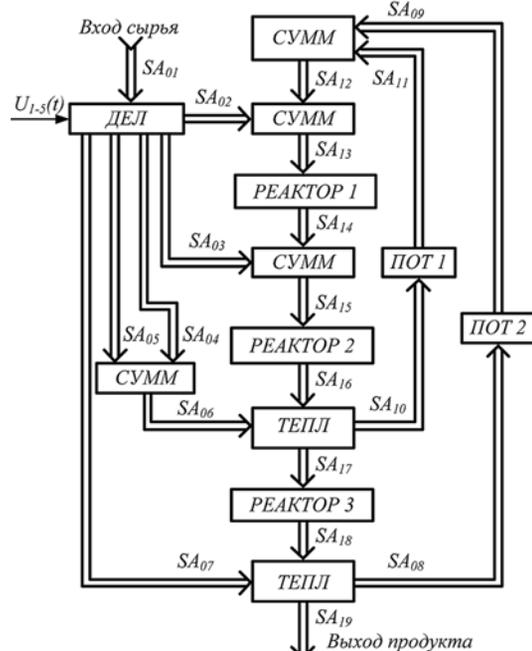


Рис. 2. Схема материальных потоков внутри колонны синтеза аммиака

как физические процессы (смешение, разделение, теплообмен материальных потоков), так и химические (химическое превращение веществ). Каждый процесс в колонне синтеза представлен на схеме отдельным блоком, кроме того, на схеме представлены материальные потоки $SA_{XX}\{T, P, F, M\}$, где $XX = 01, \dots, 19$ — порядковый номер соответствующего потока на схеме (рис. 2). Каждый материальный поток обладает следующими характеристиками: T_{XX} — температура; P_{XX} — давление; M_{XX}^p — состав потока (содержание элемента p в потоке SA_{XX}); F_{XX} — объемный (массовый) расход вещества. Также на схеме отображены основные управляющие воздействия $U_1(t), \dots, U_4(t)$ — положение задвижек, регулирующих расходы по байпасным линиям (потоки SA_{02}, \dots, SA_{05}), $U_5(t)$ — по основному ходу (поток SA_{07}).

Краткое описание блоков представлено в таблице.

Блоки, моделирующие физические законы (в том числе законы термодинамики [2, 3]), имеют достаточно точное математическое описание. Результаты моделирования блоков, описывающих химические преобразования в катализаторных полках (блоки **РЕАКТОРЫ 1, 2, 3**), при применении типовых формул показали низкую сходимость с фактическими данными (доверительная вероятность $\alpha < 0,9$), что обусловлено значительной зависимостью

интенсивности протекания химических реакций от индивидуальных особенностей каждого из агрегатов.

В данной работе предлагается использовать натурные данные при моделировании химических процессов, протекающих на катализаторных полках, наравне с физическими законами, которым подчиняются остальные элементы колонны синтеза, с целью повысить точность прогнозирования.

Определение интенсивности протекания химической реакции (количества образовавшегося на катализаторной полке аммиака $M_{\text{ВЫХ}}^{\text{NH}_3}$) по таким косвенным признакам, как изменение температуры газового потока после катализаторной полки, рассмотрено в работе [4]. Данная зависимость может быть представлена в виде

$$M_{\text{ВЫХ}}^{\text{NH}_3} = - \frac{0,8989 \left(T_{\text{ВХ}} + \Delta T - K_T T_{\text{ВХ}} + T_{\text{ВХ}} M_{\text{ВХ}}^{\text{NH}_3} + \Delta T M_{\text{ВХ}}^{\text{NH}_3} \right) +}{T_{\text{ВХ}} + \Delta T + T_{\text{ВХ}} M_{\text{ВХ}}^{\text{NH}_3} + \Delta T M_{\text{ВХ}}^{\text{NH}_3} - K_T T_{\text{ВХ}} M_{\text{ВХ}}^{\text{NH}_3} -} \rightarrow \frac{+ K_T M_{\text{ВХ}}^{\text{NH}_3} (1,6 \cdot 10^3 - T_{\text{ВХ}})}{-0,8989 K_T T_{\text{ВХ}} - 1,6 \cdot 10^3 K_T} \quad (1)$$

Обозначение	Описание	Краткое математическое описание
<i>ДЕЛ</i>	Делитель потоков. Физически представляет собой задвижки и линии трубопроводов. Служит для разделения потоков газа на входе колонны синтеза. Расход газа F_i регулируется путем изменения клапанов U_i [0; 100]%	$F_i = \frac{F_{01} \pi R_i^2 [1 - \cos(0,5\pi U_i)]}{\sum_{i=1}^5 S_i(U_i)}$ <p>где $R_i, \text{ м}$ — радиус трубопровода i-го потока; $S_i(U_i), \text{ м}^2$ — текущая площадь сечения клапана i-го потока</p>
<i>СУММ</i>	Сумматор. Представляет собой объем внутри колонны, в котором происходит смешение потоков. В ходе смешения изменяются мольные доли веществ, составляющих исходные газовые потоки (M^p) и их температуры (T)	$M_{\text{ВЫХ}}^p = \frac{F_{\text{ВХ1}}}{F_{\text{ВХ1}} + F_{\text{ВХ2}}} M_{\text{ВХ1}}^p + \frac{F_{\text{ВХ2}}}{F_{\text{ВХ1}} + F_{\text{ВХ2}}} M_{\text{ВХ2}}^p$ $T_{\text{ВЫХ}} = \frac{c_{\text{ВХ1}} F_{\text{ВХ1}} \rho_{\text{ВХ1}} T_{\text{ВХ1}} + c_{\text{ВХ2}} F_{\text{ВХ2}} \rho_{\text{ВХ2}} T_{\text{ВХ2}}}{c_{\text{ВЫХ}} \rho_{\text{ВЫХ}} (F_{\text{ВХ1}} + F_{\text{ВХ2}})}$ <p>где $c, \text{ ккал/м} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ — коэффициент теплопроводности; $\rho, \text{ кг/м}^3$ — плотность газовой смеси; $F, \text{ кг/ч}$ — массовый расход газовой смеси; $T, \text{ }^\circ\text{C}$ — температура потока; P — обозначение искомого вещества</p>
<i>ТЕПЛ</i>	Теплообменные аппараты. Представляют собой встроенные теплообменники трубчатого типа, служат для обмена энергией между внутренними газовыми потоками	$T_{\text{ВЫХ1}} = \frac{c_{\text{ВХ2}} \rho_{\text{ВХ2}} F_{\text{ВХ2}}}{c_{\text{ВХ1}} \rho_{\text{ВХ1}} F_{\text{ВХ1}}} (T_{\text{ВХ2}} - T_{\text{ВЫХ2}}) + T_{\text{ВХ1}}$
<i>РЕАКТОР 1, 2, 3</i>	Катализаторные полки, где в процессе химических преобразований происходит изменение состава потока (образование аммиака), его температуры и массового расхода	$\frac{1}{M^{\text{NH}_3}} = \frac{W P^{-1,04}}{35,7 T + 13535} + 0,74 P^{-0,55}$ <p>где M^{NH_3} — мольная доля аммиака на выходе из катализаторной полки; $P, \text{ кПа}$ — давление в колонне синтеза; $T, \text{ }^\circ\text{C}$ — температура входящего потока; $W, \text{ кг/м}^3 \cdot \text{ ч}$ — объемная скорость газа</p>
<i>ПОТ 1, 2</i>	Функции, описывающие потери теплоты при прохождении потоков по кольцевому зазору между катализаторными коробками и стенками колонны синтеза, а также процесс теплообмена между газом внутри и вне катализаторных коробок	$T_{\text{ВЫХ}} = \frac{Q_{\text{П}}}{c_{\text{ВХ}} \rho_{\text{ВХ}} F_{\text{ВХ}}} + T_{\text{ВХ}}$ <p>где $Q_{\text{П}}, \text{ ккал}$ — количество теплоты, теряемого потоком при прохождении им катализаторной полки за счет теплообмена между катализаторной полкой и газом, проходящим по кольцевому зазору</p>

где $M_{\text{ВХ}}^{\text{NH}_3}$ — мольная доля аммиака в газовом потоке, входящем в катализаторную полку; $T_{\text{ВХ}}$ — температура входного потока; K_T — коэффициент теплопотерь, $\Delta T = T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}}$ — приращение температуры потока после катализаторной полки.

Изменение расхода после катализаторной полки определяется по формуле [3, 4]

$$F_{\text{ВЫХ}} = F_{\text{ВХ}} \frac{1 + M_{\text{ВХ}}^{\text{NH}_3}}{1 + M_{\text{ВЫХ}}^{\text{NH}_3}} \quad (2)$$

Использование ретроспективных данных о значениях режимных параметров необходимо для прогнозирования изменения температуры потока после катализаторной полки в зависимости от температуры входного потока реактора. В подтверждение того, что зависимость является линейной, проведено сравнение η — теоретического корреляционного соотношения — с r — коэффициентом корреляции [5, 6]:

$$\eta = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (dT_{\text{ВЫХ}}^{\text{рас}}(i) - d\bar{T}_{\text{ВЫХ}}(i))^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (dT_{\text{ВЫХ}}(i) - d\bar{T}_{\text{ВЫХ}}(i))^2}}; \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (dT_{\text{ВХ}}(i)dT_{\text{ВЫХ}}(i)) - \frac{\sum_{i=1}^n dT_{\text{ВХ}}(i) \sum_{i=1}^n dT_{\text{ВЫХ}}(i)}{n}}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n dT_{\text{ВХ}}(i) - \frac{\sum_{i=1}^n dT_{\text{ВХ}}^2(i)}{n} \right] \left[\sum_{i=1}^n dT_{\text{ВЫХ}}(i) - \frac{\sum_{i=1}^n dT_{\text{ВЫХ}}^2(i)}{n} \right]}}, \quad (4)$$

где $dT_{\text{ВХ}}$, $dT_{\text{ВЫХ}}$ — скорость изменения температур потоков, входящих и выходящих с катализаторных полок; $d\bar{T}_{\text{ВЫХ}}$, $dT_{\text{ВЫХ}}^{\text{рас}}$ — средняя скорость изменения температур потоков, выходящих с катализаторных полок, и ее расчетное значение; n — объем выборки.

При выполнении условия $\eta = r$ можно говорить о том, что зависимость между скоростями изменения температур dT является линейной, а значит, имеет вид

$$dT_{\text{ВЫХ}}^{\text{рас}}(i) = kdT_{\text{ВХ}}(i), \quad (5)$$

где k — коэффициент пропорциональности, определяемый по методу наименьших квадратов [5].

При проведении анализа были выявлены временные участки, на которых условие равенства $\eta = r$ как выполнялось (значения), так и не выполнялось. Причиной неравенства является влияние существующей системы управления, а именно, действия оператора-технолога, направленные на стабилизацию режимных параметров. В результате этих действий фактическая скорость изменения становится сопоставима с уровнем помех, и после фильтрации измеренных значений определить зависимость между температурами по полученным данным не

представляется возможным. Для решения данной проблемы предложено в процессе управления реализовывать незначительные управляющие воздействия в целях получения необходимых данных.

Были определены параметры эксперимента: минимальная необходимая скорость изменения технологических параметров и соответствующие ей значения и длительность управляющих воздействий.

По натурным данным построена зависимость между коэффициентом корреляции и модулем скорости изменения температур потоков, входящих в катализаторные слои (рис. 3).

Как видно из графика для первой катализаторной полки, изображенного на рис. 3, при увеличении скорости изменения модуля входной температуры значение r стремится к единице. Значение коэффициента Стьюдента $K_{\text{ФАКТ}}$ при линейной однофакторной связи определяется по формуле [5]

$$K_{\text{ФАКТ}} = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}. \quad (6)$$

Подставив в формулу (6) фактические значения r , получим зависимость $K_{\text{ФАКТ}}$ от скорости изменения входной температуры $|dT_{\text{ВХ}}|$ (рис. 4).

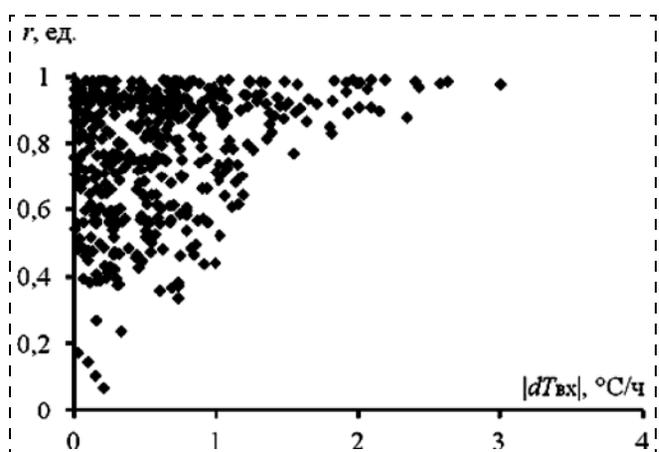


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции r от модуля скорости изменения входной температуры $|dT_{\text{ВХ}}|$ для первого катализаторного слоя

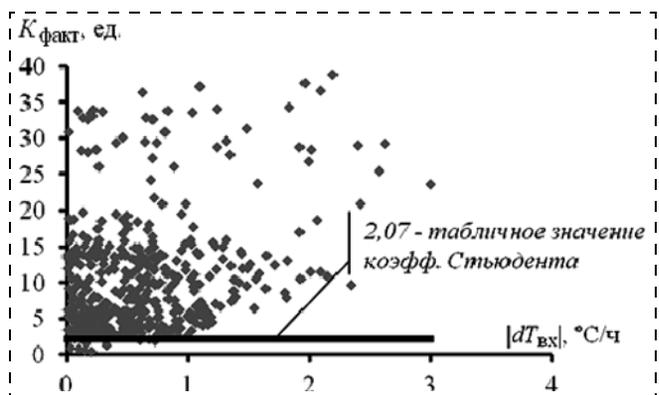


Рис. 4. Зависимость коэффициента Стьюдента $K_{\text{ФАКТ}}$ от модуля скорости изменения входной температуры $|dT_{\text{ВХ}}|$ для первого катализаторного слоя

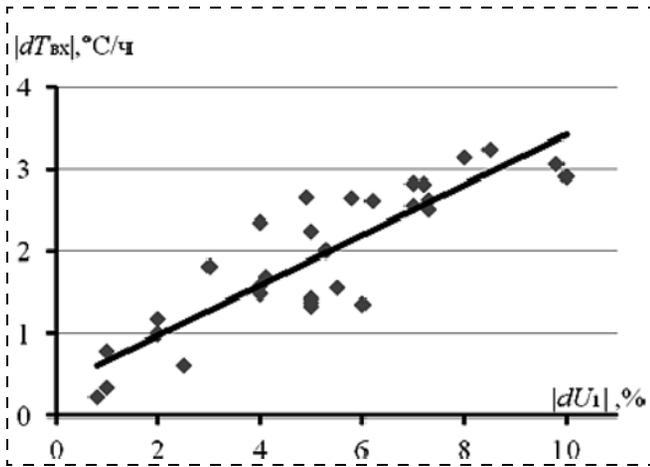


Рис. 5. Зависимость скорости изменения входной температуры для первого катализаторного слоя от изменения положения задвижки TCV-604

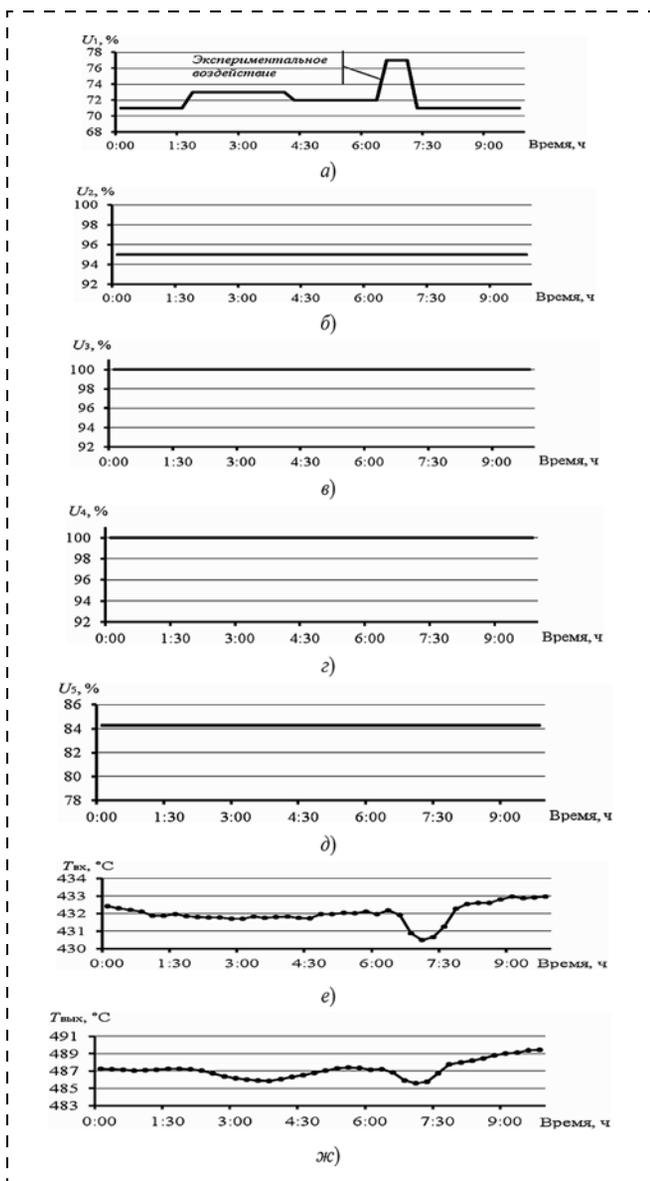


Рис. 6. Результат проведения активного эксперимента для получения данных о температурах потоков на входе $T_{вх}$ и выходе $T_{вых}$ с первой катализаторной полки

Табличное значение коэффициента Стьюдента $K_{табл}$ для $n = 30$ и доверительной вероятности $p = 0,975$ составляет 2,07. Как видно из графика (рис. 4), при скорости изменения входной температуры менее $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ вероятность появления значения $K_{факт} < K_{табл}$ — не нулевая. В качестве минимального значения необходимой скорости изменения входной температуры для первой полки при проведении эксперимента выбрано значение $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

Как видно из графика, изображенного на рис. 5, для скорости изменения температуры входящего потока необходимо реализовать экспериментальное управляющее воздействие не менее $\pm 5\%$. Так как для построения регрессионной зависимости знак скорости изменения не важен, то направление изменения положения регулирующей задвижки определяются в зависимости от текущего ее положения: если значение степени открытия задвижки близко к 100 %, то в ходе активного эксперимента задвижка прикрывается на 5 %, и наоборот.

На рис. 6 представлен пример проведения активного исследовательского эксперимента [6]. На представленном временном интервале оператор поддерживает технологический режим путем изменения положения задвижки U_1 первого холодного

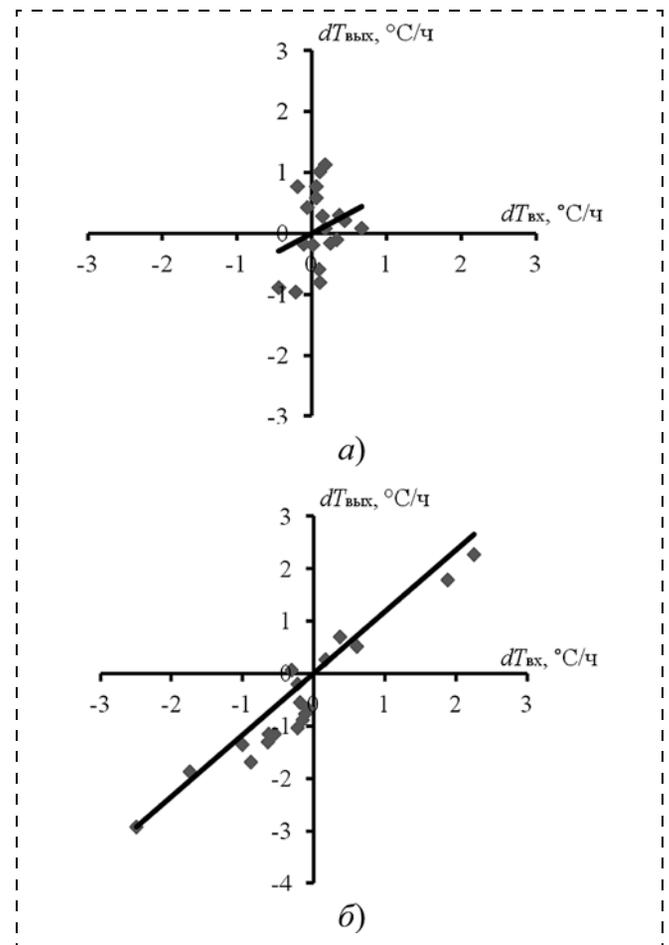


Рис. 7. Связь между скоростями температур потоков $dT_{вх}$ и $dT_{вых}$ до и после эксперимента для первой катализаторной полки: а — до эксперимента, $r = 0,567$; б — после эксперимента, $r = 0,974$

байпаса (см. рис. 1, вход B). Положения остальных задвижек U_2, \dots, U_5 , в процессе эксперимента остаются без изменений (рис. 6, б–д). Затем оператор наносит экспериментальное воздействие +5 % (рис. 6, а), чем вызывает изменение как входной температуры $T_{\text{вх}}$ первой катализаторной полки, так и температуры потока $T_{\text{вых}}$ после первой катализаторной полки (рис. 6, е, ж).

По результатам проведенного эксперимента коэффициент корреляции r , до эксперимента имевший значение 0,567, увеличился до 0,974 (рис. 7).

Заключение

Зависимость между температурами на входе и выходе с катализаторных полок не является функциональной ($r < 1$). Следовательно, при предоставлении результатов оператору-технологу должна предоставляться информация не только о расчетном значении производительности, но и о возможных отклонениях прогнозного значения от фактического с учетом среднего отклонения от аппроксимации

каждой из катализаторных полок. По результатам вычислений оператору должен предоставляться диапазон, внутри которого с определенной вероятностью будет находиться значение производительности колонны синтеза после реализации управляющих воздействий, предложенных интеллектуальной системой управления.

Список литературы

1. Яновский Н. А. Аммиак. Вопросы технологии / Под ред. Н. А. Яновского Донецк: ГИК "Новая печать", ООО "Лебедь", 2001. 497 с.
2. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
3. Ganz С. Н. Теоретические основы и технология синтеза аммиака. Харьков: Высшая школа, 1969. 260 с.
4. Кулаков С. М., Торопов Д. В. Оперативная оценка эффективности процесса синтеза аммиака в трехполочной колонне // Вестник КузГТУ. 2014. № 2. С. 85–88.
5. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
6. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления / С. В. Емельянов, С. К. Коровин, А. С. Рыков и др. Кемерово: Кузбассвузиздат, 2007. 307 с.

S. M. Kulakov, Professor, kulakov-ais@mail.ru, D. V. Toropov, Postgraduate Student, denis-toropov@mail.ru, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Integration of Methods of Mathematical Modeling of Chemical Processes in the Column Ammonia Synthesis

The article describes one of the variants of the mathematical model ammonia converter, which is part of intelligent control system. A distinctive feature described in the article the method of mathematical modeling the ammonia production process is different description for the physical and chemical processes. The description of physical processes carried out by standard formulas. To describe the chemical processes in the synthesis column formulas and coefficients applied thereto determined by regression analysis of field data obtained during the active experiment. Task assigned to the block of mathematical modeling in the framework of intellectual management system is the prediction of the outputs of the control actions generated by the control system and choosing the best of them. The mathematical model is based on increments, so field data are analyzed for changes in the rate and magnitude values of physical quantities. Identified and presented requirements for the active experiment, consider a method of test data for valid reflection of the processes occurring in the synthesis column.

Keywords: development of intellectual control system, an expert knowledge base, mathematical modeling of chemical processes for ammonia synthesis.

References

1. Yanovskiy N. A. Ammiak. Voprosy tekhnologii / Pod red. N. A. Yanovskogo Donetsk: GIK "Novaya pechat", ООО "Lebed'", 2001. 497 p.
2. Vargafitik N. B. Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey. M.: Nauka, 1972. 721 p.
3. Ganz S. N. Teoreticheskie osnovy i tekhnologiya sinteza ammiaka. Khar'kov: Vysshaya shkola, 1969. 260 p.

4. Kulakov S. M., Toropov D. V. Operativnaya otsenka effektivnosti protsesssa sinteza ammiaka v trekhpolochnoy kolonne. Vestnik KuzGTU. 2014. № 2. P. 85–88.
5. Kobzar' A. I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov. M.: FIZMATLIT, 2006. 816 p.
6. Emel'yanov S. V., Korovin S. K., Rykov A. S. et al. Metody identifikatsii promyshlennykh ob'ektov v sistemakh upravleniya. Keмерово: Kuzbassvuzizdat, 2007. 307 p.

УДК 621.231

Б. В. Новоселов, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., signal@kovrov.ru,
ОАО "Всероссийский научно-исследовательский институт "Сигнал"

Параметрические и структурные возможности следающих дифференциальных приводов с опорным каналом

Показаны широкие возможности варьирования параметров и структурно-компоновочного построения следающих дифференциальных приводов с опорным каналом с использованием взаимного обмена информацией между управляемым и опорным каналами. Дан обзор основных опубликованных работ по этому классу следающих приводов. Отмечены проблемные вопросы, подлежащие дальнейшему исследованию.

Ключевые слова: следающий дифференциальный привод с опорным каналом, опорный и управляемый каналы, диапазон регулирования, инвариантность

Введение

В настоящее время опубликовано достаточно много работ [1–9], посвященных исследованию возможностей следающих дифференциальных приводов с опорным каналом (СДПОК), исходная структурная схема которых представлена на рис. 1. В таких приводах скорость вращения Ω_3 нагрузки Н определяется вычитанием на дифференциале Д постоянной скорости Ω_0 опорного канала (ОК) и переменной скорости Ω_y управляемого канала (УК), причем в исходном состоянии $\Omega_0 = \Omega_y$ за счет опорного напряжения $U_{оп}$, а Н — неподвижна.

Совокупность упомянутых публикаций достаточно полно раскрывает следующие основные достоинства этих приводов:

- низкие скорости нагрузки обеспечиваются за счет вычитания высоких скоростей двигателей управляемого и опорного каналов, что уменьшает влияние отрицательных факторов, присущих двигателям при малых скоростях их вращения;

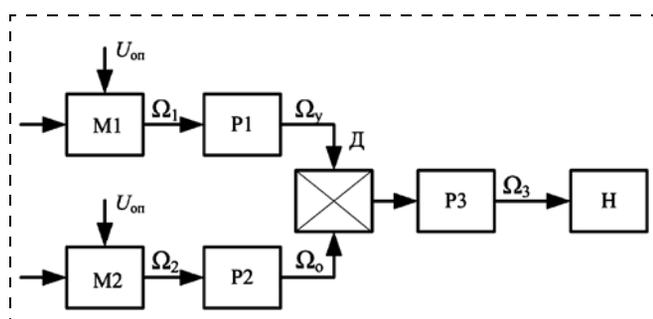


Рис. 1. Двухканальный дифференциальный привод с опорным каналом:
М1, М2 — электродвигатели; Д — механический дифференциал;
Р1, Р2, Р3 — редукторы; Н — нагрузка

- широкий диапазон регулирования скорости нагрузки обеспечивается при сравнительно малом диапазоне регулирования скорости управляемого канала, что позволяет использовать наиболее качественные участки регулировочных характеристик элементов каналов;
- реверс нагрузки может быть получен без реверса двигателей управляемого и опорного каналов, что позволяет использовать в качестве исполнительных двигателей следающего привода двигатель с последовательным возбуждением и уменьшить влияние отрицательных факторов механических передач, проявляющихся в динамике;
- наличие запаса кинетической энергии у вращающихся с высокими скоростями двигателей управляемого и опорного каналов уменьшает влияние отрицательных факторов редукторов, проявляющихся при вращении нагрузки с малыми скоростями;
- возможность использования согласного включения двигателей в режимах отработки приводом больших рассогласований позволяет расширить диапазон регулирования скорости не только за счет нижних скоростей нагрузки, но и за счет подъема уровня высоких скоростей;
- условия обдува двигателей при длительном перемещении нагрузки с малыми скоростями улучшаются;
- наличие двух каналов передачи управляющего воздействия и восприятия возмущающего момента облегчает выполнение условий инвариантности привода как относительно управляющего, так и относительно возмущающего воздействий, причем для обеспечения инвариантности привода относительно возмущающего воздействия нет необходимости иметь специ-

альный измеритель моментного возмущения, в качестве него можно использовать информацию с одного из каналов привода.

Но всегда нужно помнить, что реализация таких приводов требует: использования дифференциала с малыми люфтами, полного или частичного устранения отрицательного взаимовлияния каналов; упрощения схемы управления и кинематических цепей привода, так как наличие двух каналов может усложнить схему и резко снизить его габаритно-весовые характеристики; применения более точных измерителей сигналов в каналах, хотя и в узких пределах изменения измеряемой величины.

Получить возможность использовать достоинство СДПОК и ослабить проявление их недостатков удается за счет оптимального выбора их параметров и элементов, а также построения таких их структур, которые смогли бы найти наилучший компромисс между достоинствами и недостатками. Целью настоящей статьи как раз и является представление предложений по выбору основных параметров СДПОК и различных оригинальных структур СДПОК, созданных автором на уровне изобретений (общим числом свыше 30). Естественно, что при ограничении объема статьи полное математическое описание и результаты исследования различных СДПОК не представляются. С рядом таких материалов читатель может ознакомиться в книгах [7–9].

Диапазон регулирования скорости

На основе анализа структурной схемы (рис. 1) рассмотрим основные характеристики СДПОК.

Выражение, определяющее выходную скорость привода Ω_3 , имеет вид

$$\Omega_3 = \Omega_1/i_1 - \Omega_2/i_2, \quad (1)$$

где Ω_1, Ω_2 — скорости вращения двигателей М1, М2 соответственно; $i_1 = i_{p1}i_d i_{p3}$, $i_2 = i_{p2}i_d i_{p3}$ — передаточные числа механических передач от соответствующих двигателей до нагрузки, где i_1, i_2, i_3 — передаточные числа редукторов Р1, Р2, Р3, соответственно; i_d — передаточное число дифференциала.

Диапазон регулирования скорости Ω_3 :

$$D_3 = \Omega_{3\max}/\Omega_{3\min}. \quad (2)$$

Предположим, что при регулировании скорости Ω_2 скорость $\Omega_1 = \text{const}$, $i_1 = i_2 = i_{\text{п}}$, тогда минимальное значение $\Omega_{3\min}$ обеспечивается при $\Omega_{2\max}$:

$$\Omega_{2\max} = \Omega_1 - i_{\text{п}}\Omega_{3\min}, \quad (3)$$

а максимальное значение $\Omega_{3\max}$ обеспечивается при $\Omega_{2\min}$:

$$\Omega_{2\min} = \Omega_1 - i_{\text{п}}\Omega_{3\max}. \quad (4)$$

Разделив выражение (3) на (4), получим зависимость для диапазона регулирования скорости управляемого канала D_2 :

$$D_2 = \frac{\Omega_{2\max}}{\Omega_{2\min}} = \frac{\frac{\Omega_1}{i_{\text{п}}\Omega_{3\min}} - 1}{\frac{\Omega_1}{i_{\text{п}}\Omega_{3\max}} - D_3} = \frac{D_3 \frac{i_{\text{п}}\Omega_{3\max}}{\Omega_1}}{D_3 \left(1 - \frac{i_{\text{п}}\Omega_{3\max}}{\Omega_1}\right)}. \quad (5)$$

Из анализа зависимости (5) и построенных по ней при различных значениях соотношения $\frac{\Omega_1}{i_{\text{п}}\Omega_{3\min}}$ графиков (рис. 2, а) следует, что для уменьшения величины D_2 необходимо стремиться к выполнению условия

$$\Omega_1/(i_{\text{п}}\Omega_{3\min}) > D_3. \quad (6)$$

Из анализа той же зависимости (5) при различных значениях соотношения $\frac{i_{\text{п}}\Omega_{3\max}}{\Omega_1}$ видно, что для требуемого значения $D_3 > 10^2$ (рис. 2, б) следует, что при обеспечении условия

$$\Omega_1 = 10i_{\text{п}}\Omega_{3\max} \quad (7)$$

скорость Ω_2 регулируется в узком диапазоне ($D_2 = 1,1$). Это подтверждает принципиальную возможность обеспечения большого диапазона регулирования скорости нагрузки D_3 при малом диапазоне регулирования одного из каналов, что, в свою очередь,

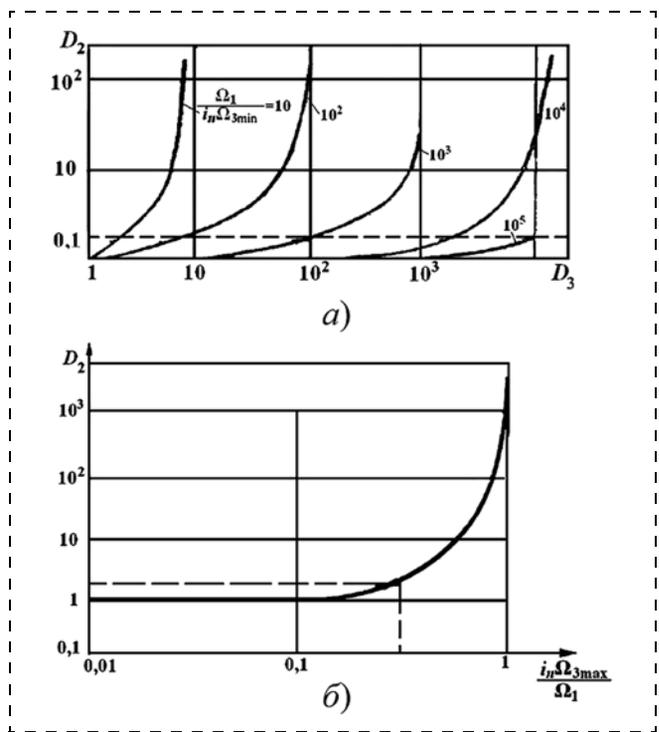


Рис. 2. Зависимости диапазона регулирования D_2 от D_3 (а) и от соотношения скоростей Ω_3, Ω_1 (б)

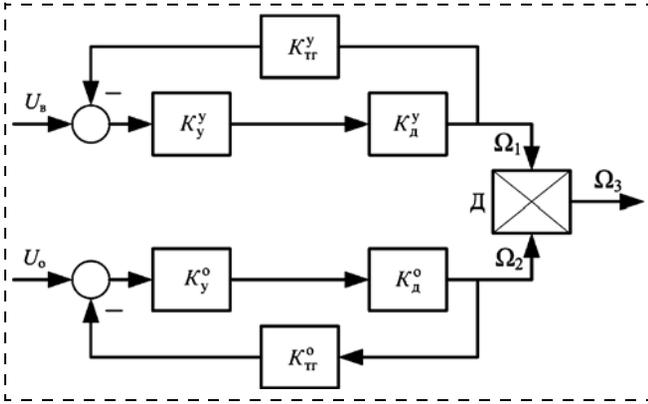


Рис. 3. Структурная схема дифференциального привода

позволяет использовать только линейные участки характеристик всех элементов системы.

Применяя методы теории чувствительности, можно найти участки рабочих характеристик элементов привода, обладающие максимальной линейностью. Пусть в несколько измененной структуре привода (рис. 3) редукторы P1, P2, P3 отсутствуют, а на входах обоих каналов, замкнутых обратными отрицательными связями по скорости, действует одинаковый сигнал $U_o = U_B$. Обозначив $K_y^y, K_y^o, K_d^y, K_d^o, K_{TT}^y, K_{TT}^o$, соответственно, коэффициенты передачи усилителя, двигателя и тахогенератора, управляемого и опорного каналов, проанализируем выражение статической ошибки по скорости такой системы (при условии $\Omega_y = \Omega_1, \Omega_o = \Omega_2$):

$$\Delta\Omega_3 = 0,5(\Omega_y - \Omega_o). \quad (8)$$

Коэффициенты передачи каналов

$$K_{\Pi}^y = \frac{K_y^y K_d^y}{1 + K_{TT}^y K_y^y K_d^y}; \quad K_{\Pi}^o = \frac{K_y^o K_d^o}{1 + K_{TT}^o K_y^o K_d^o}. \quad (9)$$

Полагая, что коэффициенты передачи звеньев имеют постоянную K_{j0} и переменную ΔK_j составляющие, получаем

$$K_j = K_{j0} + \Delta K_j. \quad (10)$$

При условии независимости отклонений, пренебрегая величинами второго порядка малости, можно записать

$$\Delta\Omega_3 = (\Delta K_{\Pi}^y - \Delta K_{\Pi}^o) U_o, \quad (11)$$

где

$$\Delta K_{\Pi}^y = \frac{\partial K_{\Pi}^y}{\partial K_{TT}^y} \Delta K_{TT}^y + \frac{\partial K_{\Pi}^y}{\partial K_y^y} \Delta K_y^y + \frac{\partial K_{\Pi}^y}{\partial K_d^y} \Delta K_d^y; \quad (12)$$

$$\Delta K_{\Pi}^o = \frac{\partial K_{\Pi}^o}{\partial K_{TT}^o} \Delta K_{TT}^o + \frac{\partial K_{\Pi}^o}{\partial K_y^o} \Delta K_y^o + \frac{\partial K_{\Pi}^o}{\partial K_d^o} \Delta K_d^o. \quad (13)$$

Выражение (11) с учетом (12) и (13) преобразуется к виду

$$K_{\Pi}^y = \left(\frac{\Delta U_y^y}{K_y^y} + \frac{\Delta \Omega_d^y}{K_y^y K_d^y} - \Delta U_{TT}^y \right) - K_{\Pi}^o \left(\frac{\Delta U_y^o}{K_y^o} + \frac{\Delta \Omega_d^o}{K_y^o K_d^o} - \Delta U_{TT}^o \right). \quad (14)$$

Составляющие ошибки в выражении (14), вызванные, соответственно, отклонениями напряжений усилителей $\Delta U_y^y, \Delta U_y^o$, скоростей двигателей $\Delta \Omega_d^y, \Delta \Omega_d^o$

и напряжений тахогенераторов $\Delta U_{TT}^y, \Delta U_{TT}^o$, в зоне больших сигналов меньше, чем в зоне малых сигналов. Кроме того, в рассматриваемых приводах широкий диапазон регулирования скорости нагрузки может быть обеспечен и при небольшом диапазоне регулирования скорости управляемого канала. Это позволяет использовать те участки регуляровочных характеристик элементов каналов, где отклонения от линейности незначительны, и, следовательно, погрешности элементов малы.

Допустимая неравномерность вращения исполнительных двигателей привода

Для обеспечения необходимых выходных характеристик следящего привода необходимо знать требования, предъявляемые к его составным элементам.

Рассмотрим допустимую неравномерность вращения исполнительных двигателей привода при обеспечении им требуемого диапазона регулирования скорости нагрузки. Пусть регулирование скорости Ω_3 в схеме на рис. 1 осуществляется за счет изменения скорости Ω_2 . Тогда в соответствии с уравнением (1) запишем выражение, связывающее отклонения скоростей Ω_2 и Ω_3 при $\Omega_1 = \text{const}$:

$$\Delta\Omega_3 = \Delta\Omega_2 / i_{\Pi}. \quad (15)$$

Получим соотношения между заданным изменением δ_3 выходной скорости Ω_3 и допустимым при этом изменением δ_2 скорости Ω_2 :

$$\delta_3 = \frac{\Omega_3 + \Delta\Omega_3}{\Omega_3} = 1 + (\delta_2 - 1) \left(\frac{\Omega_1}{i_{\Pi} \Omega_3} - 1 \right), \quad (16)$$

$$\delta_2 = \frac{\Omega_2 + \Delta\Omega_2}{\Omega_2} = 1 + \frac{i_{\Pi} \Omega_3}{\Omega_2} (\delta_3 - 1) = 1 + \frac{(\delta_3 - 1)(1 - \Omega_2 / \Omega_1)}{(\Omega_2 / \Omega_1)}. \quad (17)$$

Графические зависимости $\delta_2 = f(i_{\Pi} \Omega_3 / \Omega_2)$ и $\delta_2 = f(\Omega_2 / \Omega_1)$ при $\delta_3 = 1,1$ представлены на рис. 4.

Анализ полученных графиков и зависимости (5) показывает, что стремление обеспечить $\Omega_{3\text{min}}$ при

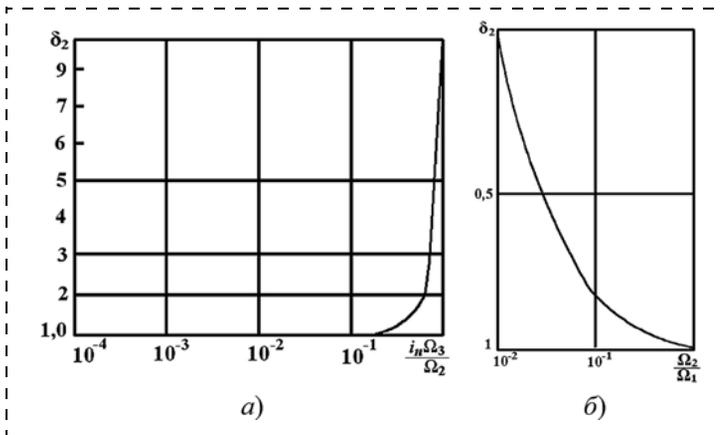


Рис. 4. Зависимости изменения скорости δ_2 от соотношения скоростей Ω_3, Ω_2 (а) и Ω_2, Ω_1 (б)

высоких вычитаемых скоростях Ω_1, Ω_2 не всегда целесообразно, так как при $\frac{\Omega_1}{i_{\pi} \Omega_{3\max}} \geq 10$ выигрыш в уменьшении величины D_2 незначителен, а требования к допустимому значению δ_2 возрастают. Поэтому при регулировании скорости Ω_3 за счет изменения скорости одного из двигателей должно выполняться условие

$$\Omega_{2\max} = \Omega_1 \leq 10 i_{\pi} \Omega_{3\max}. \quad (18)$$

Исходя из допустимой неравномерности δ_3 и реальных погрешностей измерителей скорости исполнительных двигателей обоих каналов можно выбрать значение опорной скорости в приводе, обеспечивающее оптимальные диапазоны регулирования управляемой $\Omega_2(t)$ и выходной скоростей $\Omega_3(t)$.

Метод выбора значения скорости опорного канала

Рассмотрим случай, когда регулирование скорости движения нагрузки $\Omega_H = \Omega_3$ обеспечивается изменением только скорости управляемого канала Ω_2 при постоянном значении опорной скорости ($\Omega_1 = \text{const}$). При этих условиях диапазон регулирования D_2 скорости Ω_2 определяется выражением (5).

Обозначим

$$\Omega_1 / (i_{\pi} \Omega_{H\min}) = a. \quad (19)$$

Из анализа зависимостей диапазона регулирования D_2 скорости управляемого канала от диапазона регулирования скорости нагрузки $D_2 = f(D_3)$ при $a = \text{const}$ (рис. 5) следует, что чем больше значение a , тем при меньшем диапазоне регулирования скорости Ω_2 может быть получен требуемый диапазон регулирования выходной скорости D_3 . Например, $D_3 = 10^4$ может быть обеспечен при $D_2 = 10, a = 10^3$ и при $D_2 = 10^2, a = 10^2$. При $\Omega_1 = 0$, т. е. в одноканальном следящем приводе, $a = 0$ и, следовательно, чтобы обеспечить диапазон $D_3 = 10^4$, необходимо иметь $D_2 = 10^4$, так как в данном случае $D_2 = D_3$.

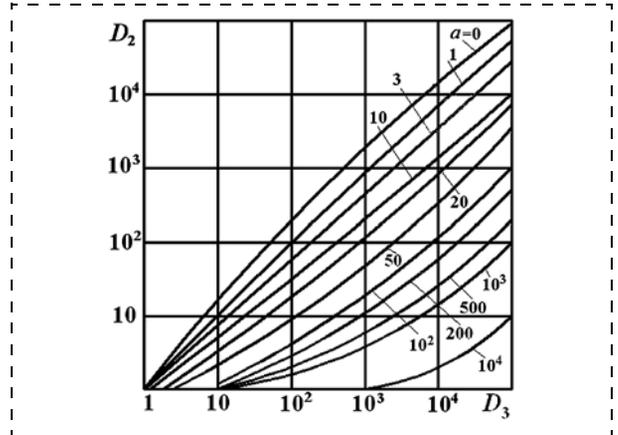


Рис. 5. Зависимости диапазонов регулирования $D_2 = f(D_3)$

Связь изменений скоростей Ω_2 и $\Omega_H = \Omega_3$ выражается зависимостью (15).

Учитывая, что отклонения скоростей Ω_2, Ω_H от заданных значений определяются выражениями $\delta_2 = (\Omega_2 + \Delta\Omega_2)/\Omega_2$ и $\delta_H = (\Omega_H + \Delta\Omega_H)/\Omega_H$, можно найти соотношение между δ_H и δ_2 :

$$\delta_H = 1 + (\delta_2 - 1)[1 + \Omega_1/i_{\pi}\Omega_H]. \quad (20)$$

При известном значении величины δ_2 максимальное значение полученного отклонения выходной скорости определяется выражением

$$\delta_{H\max} = 1 + (\delta_2 - 1) \left(1 + \frac{\Omega_1}{i_{\pi}\Omega_H} \right)$$

или $\delta_{H\max} = 1 + (\delta_2 - 1)(1 + a)$.

Окончательно находим

$$\delta_2 = 1 + (\delta_{H\max} - 1)/(1 + a). \quad (21)$$

Зависимости $\delta_2 = f(\delta_{H\max})$ при различных значениях $a = \text{const}$ показаны на рис. 6.

Из анализа этих зависимостей следует, что при заданной неравномерности $\delta_{H\max}$ требования к неравномерности δ_2 тем жестче, чем больше величина a . Например, при $\delta_{H\max} = 1,01$ (что соответствует отклонению выходной скорости на 1 %) допускаются следующие отклонения скорости Ω_2 : при $a = 10^2$ $\delta_2 = 1,0001$ (0,01 %); при $a = 10$ $\delta_2 = 1,0009$ (0,09 %);

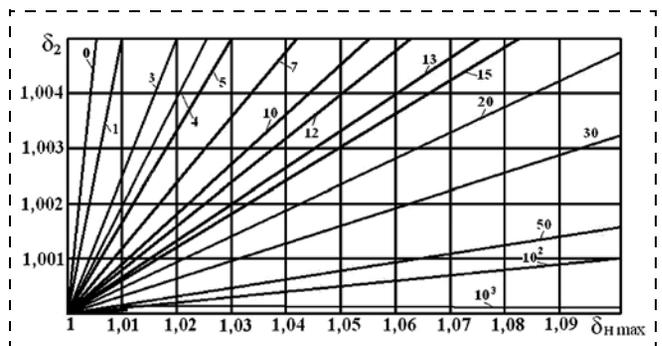


Рис. 6. Зависимости неравномерностей скоростей $\delta_2 = f(\delta_H)$

при $a = 1$ $\delta_2 = 1,05$ (0,5 %); при $a = 0$, т. е. для одноканального привода, $\delta_2 = \delta_{n \max}$.

Реальная погрешность измерителей скорости составляет: для тахогенераторов 0,2...1 %, для цифровых датчиков скорости 0,01...0,1 %. Следовательно, если допустить, что нестабильность скорости Ω_2 из-за реальной погрешности тахогенератора в управляемом канале привода составляет 0,2 % ($\delta_2 = 1,002$), то по зависимости на рис. 6 определим, что при заданном значении $\delta_{n \max} = 1,01$ (1 %) значение a должно быть не более 4. Однако при требуемых диапазонах регулирования скорости нагрузки (например, $D_3 = 10^4$) и регулирования скорости управляемого канала (например, $D_2 = 30$) значение a , как следует из зависимости на рис. 5, должно быть более 100.

Таким образом, для получения требуемого диапазона регулирования скорости D_3 при желаемом значении диапазона D_2 необходимо увеличивать величину a , однако с учетом допустимого значения неравномерности выходной скорости δ_n и реальной погрешности измерителя скорости в управляемом канале величину a необходимо уменьшать. Поэтому желательно определить оптимальное соотношение значений указанных параметров.

В том случае, когда величина $i_{п} \Omega_{n \min}$ известна и величина a выбрана, опорная скорость Ω_1 определяется выражением $\Omega_1 = a i_{п} \Omega_{n \min}$.

Если задано максимальное значение выходной скорости, то опорная скорость $\Omega_1 = (a i_{п} / D_3) \Omega_{n \max}$.

Указанные выражения для определения опорной скорости предполагают известным передаточное число механической передачи $i_{п}$, наиболее рациональное значение которого выбирается не только из условий обеспечения запасов по скорости, моменту и ускорению в приводе, но и с учетом требуемой минимальной скорости вращения выходного вала.

Запишем выражение, связывающее минимальное значение регулируемой скорости двигателя управляемого канала и скорости нагрузки. При $\Omega_1 = \text{const}$ получаем

$$\Omega_{2 \min} = i_{п} \Omega_{n \min} + \Omega_1. \quad (22)$$

Представим это выражение в виде

$$\Omega_{2 \min} / i_{п} \Omega_{n \min} = 1 + a, \quad (23)$$

откуда

$$i_{п} = \frac{\Omega_{2 \min}}{\Omega_{n \min}} (1 + a)^{-1} \quad (24)$$

или

$$\Omega_{2 \min} = i_{п} \Omega_{n \min} (1 + a). \quad (25)$$

Для одноканального привода ($\Omega_1 = 0$ и, следовательно, $a = 0$) имеем $\Omega_{2 \min} = i_{п} \Omega_{n \min}$, т. е. выбранное число $i_{п}$ и требуемая величина $\Omega_{2 \min}$ опреде-

ляют минимальную скорость вращения выходного вала исполнительного двигателя.

Очевидно, с уменьшением значения $\Omega_{n \min}$ уменьшается и значение $\Omega_{2 \min}$, которое при малых скоростях движения нагрузки в приводе с широким диапазоном регулирования скорости может быть значительно меньше минимальной скорости двигателя, допустимой по техническим условиям. Увеличение числа $i_{п}$ приводит к увеличению числа ступеней редуктора, его массы и габаритных размеров, к появлению дополнительных погрешностей.

В то же время в двухканальном приводе минимальное значение скорости двигателя управляемого канала, как следует из формулы (25), при тех же значениях величин $i_{п}$ и $\Omega_{n \min}$, что в одноканальном приводе, превышает значение $\Omega_{2 \min}$ одноканального привода в $(1 + a)$ раз.

Выбором величин Ω_1 , $i_{п}$ и, следовательно, величин a в двухканальном приводе можно обеспечить работу с минимальной скоростью нагрузки при работе двигателя управляемого канала в номинальном режиме.

В общем случае $i_1 \neq i_2$, и в зависимостях $D_2 = f(D_3)$ и $\delta_2 = f(\delta_{n \max})$ величина a определяется выражением

$$a = \Omega_1 / (i_2 \Omega_{n \min}). \quad (26)$$

Выбор по указанным зависимостям величин D_2 и a определяется значениями передаточных чисел i_1 и i_2 . Действительно, при $\Omega_1 = \text{const}$ выражение $\Omega_n = f(\Omega_2)$ является уравнением прямой, которое представим в виде

$$\Omega_n = \frac{\Omega_{n \max} - \Omega_{n \min}}{\Omega_{2 \max} - \Omega_{2 \min}} \Omega_2 - \frac{\Omega_{n \max} - \Omega_{n \min}}{\Omega_{2 \max} - \Omega_{2 \min}} \Omega_{2 \min} + \Omega_{n \min}. \quad (27)$$

Преобразуя уравнение (27) с учетом выражений (1), (2), (5), получаем

$$i_1 = \frac{\Omega_{2 \min}}{\Omega_{n \min}} \frac{(D_1 - 1)}{(D_3 - 1)}, \quad (28)$$

где $\Omega_{2 \min} = \Omega_{2 \max} / D_1$.

Из выражения (26) следует, что

$$i_2 = \Omega_1 / (a \Omega_{n \min}). \quad (29)$$

Выбирая величину a и задавая Ω_1 , находим i_2 ; задавая величину i_{p3} , находим передаточные числа: $i_{p1} = i_1 / (i_d i_{p3})$ и $i_{p2} = i_2 / (i_d i_{p3})$.

В основе изложенного метода расчета передаточных чисел механических передач лежит обеспечение допустимой неравномерности перемещения нагрузки при известных точностях измерения скоростей исполнительных электродвигателей и необходимого диапазона регулирования скорости нагрузки. Могут быть и другие категории оптимальности выбора передаточных чисел, например, по минимуму энергетической загрузки двигателей и т. д. [9].

Предельные возможности привода по точности регулирования скорости

Предельные возможности привода по точности могут быть выявлены в результате оценки требований к допустимым неравномерностям величин Ω_2 , Ω_1 и $i_{\text{п}}$ при заданной неравномерности величины $\Omega_{\text{н}}$.

Выражение, характеризующее скорость движения нагрузки привода с учетом нестабильности величин Ω_2 , Ω_1 и $i_{\text{п}}$, имеет вид

$$\Omega_{\text{н0}} \pm \Delta\Omega_{\text{н}} = [(\Omega_{20} \pm \Delta\Omega_2) + (\Omega_{10} \pm \Delta\Omega_1)] / (i_{\text{п0}} \pm \Delta i_{\text{п}}), \quad (30)$$

где $\Delta\Omega_{\text{н}}$, $\Delta\Omega_2$, $\Delta\Omega_1$, $\Delta i_{\text{п}}$ — отклонения величин от своих средних значений $\Omega_{\text{н0}}$, Ω_{20} , Ω_{10} , $i_{\text{п0}}$, соответственно.

Можно показать, что у выражения (30) следует равенство

$$\Delta\Omega_{\text{н}} = \pm \frac{\Delta i_{\text{п}}}{i_{\text{п0}} \pm \Delta i_{\text{п}}} \Omega_{\text{н0}} \pm \frac{\Delta\Omega_2}{i_{\text{п0}} \pm \Delta i_{\text{п}}} \pm \frac{\Delta\Omega_1}{i_{\text{п0}} \pm \Delta i_{\text{п}}}. \quad (31)$$

Учитывая, что для прецизионных систем указанные отклонения можно рассматривать как очень малые величины, определим из уравнения (31) максимальную нестабильность выходной скорости привода $\Omega_{\text{н}}$:

$$(\Delta\Omega_{\text{н}})_{\text{max}} = \frac{\Delta\Omega_2 + \Delta\Omega_1}{i_{\text{п0}}} + \Omega_{\text{н0}} \frac{\Delta i_{\text{п}}}{i_{\text{п0}}}. \quad (32)$$

Результирующая относительная неравномерность $\delta_{\text{н}}$ выходной скорости привода $\Omega_{\text{н}}$ определяется из выражения (32) через неравномерности величин Ω_2 , Ω_1 , $i_{\text{п}}$:

$$\delta_{\text{н}} = \frac{\Delta\Omega_{\text{н}}}{\Omega_{\text{н0}}} = \delta_2 \frac{\Omega_{20}}{i_{\text{п0}} \Omega_{\text{н0}}} + \delta_1 \frac{\Omega_{10}}{i_{\text{п0}} \Omega_{\text{н0}}} \delta_{\text{п}},$$

где $\delta_2 = \Delta\Omega_2/\Omega_{20}$; $\delta_1 = \Delta\Omega_1/\Omega_{10}$; $\delta_{\text{п}} = \Delta i_{\text{п}}/i_{\text{п0}}$.

Для идентичных каналов привода при обеспечении соотношения $i_{\text{п0}} \Omega_{\text{н0}}/\Omega_{20} < 0,1 \dots 0,2$ можно записать

$$\delta_{\text{н}} = 2\delta_y \frac{\Omega_{20}}{i_{\text{п0}} \Omega_{\text{н0max}}} D_3 + \delta_{\text{п}}. \quad (33)$$

Из соотношения (33) видно, что

$$\delta_2 \approx \delta_1 \leq \frac{(\delta_{\text{н}} - \delta_{\text{п}}) i_{\text{п0}} \Omega_{\text{н0max}} / \Omega_{20}}{2D_3}. \quad (34)$$

Из анализа зависимостей (33) и (34) следует, что повышение скорости Ω_{20} относительно скорости $\Omega_{\text{н0max}}$ приводит к пропорциональному росту требований к качеству каждого из каналов привода, и, кроме того, неравномерность, вызванная погрешностями механической передачи, в прямом виде определяет величину $\delta_{\text{н}}$.

Представим величину передаточного числа $i_{\text{п}}$ с учетом кинематических погрешностей редукторов в виде

$$i_{\text{п}} = i_{\text{п0}} + \Delta i_{\text{п}} = \frac{\Omega_{20} \mp \Omega_{10}}{\Omega_{\text{н0}} + \Omega_{\text{н.р}}}, \quad (35)$$

где $\Delta\Omega_{\text{н.р}}$ — максимальное отклонение скорости нагрузки от среднего значения $\Omega_{\text{н0}}$, вызванное кинематическими погрешностями редукторов механической передачи привода.

Из выражения (35) находим

$$\Delta i_{\text{п}} = [(\Omega_{20} \mp \Omega_{10}) / (\Omega_{\text{н0}} + \Delta\Omega_{\text{н.р}})] - i_{\text{п0}}.$$

При $i_{\text{п0}} \Omega_{\text{н0}} / (\Omega_{20}) < 0,1 \dots 0,2$ можно положить $\delta_{\text{п}} \approx 0$, тогда формулы (34), (35) принимают вид

$$\delta_{\text{н}} = 2\delta_y \frac{\Omega_{20}}{i_{\text{п0}} \Omega_{\text{н0max}}} D_3; \quad (36)$$

$$\delta_1 = \delta_2 \frac{\delta_{\text{н}} i_{\text{п0}} \Omega_{\text{н0max}}}{2D_3 \Omega_2}. \quad (37)$$

Формула (37) позволяет определить требования к стабилизации скоростей каналов при заданном значении величины $(\Delta\Omega_{\text{н}})_{\text{max}}$. Очевидно, чем при большем значении Ω_{20} обеспечиваются малые скорости слежения при требуемых значениях $\Omega_{\text{н0max}}$ и D_3 , тем более жесткие требования следует предъявлять к стабилизации скоростей каналов при заданном значении $\delta_{\text{н}}$.

Однако следует учитывать, что чем выше скорость вращения электродвигателя, тем меньше ее колебания при действии моментных возмущений.

Возможные структурно-компоновочные схемы СДПОК

В процессе исследования и проектирования СДПОК автором в сотрудничестве с группой инженеров создан целый ряд их структур на уровне изобретений, представленных в таблице, где указаны номера авторских свидетельств, срок их публикации, сущность предложенных в изобретениях решений и основной достигаемый эффект: Т, Б, П — соответственно, повышение точности, быстродействия, плавности работы системы; Д — расширение диапазона регулирования скорости; Н — повышение показателей надежности за счет упрощения схемы управления.

Для наглядного и более четкого понимания изложенных в таблице решений на рис. 7, 8, 9 представлены в качестве примера две структуры СДПОК, соответственно по позициям 10 и 5 таблицы, и дано краткое описание их работы.

Структура СДПОК с расщепленными связями по входным и выходным сигналам механических передач привода (авторское свидетельство на изобретение 562792), представленная на рис. 7, позволяет уменьшить влияние на работу привода возмущающего момента со стороны нагрузки и уменьшить влияние погрешностей силовых механических передач на точность работы привода.

№ п/п	Авторское свидетельство	Бюллетень изобретений	Сущность решения	Достижимый эффект
1	407278	1973 г. № 43	Выработка корректирующего сигнала по структуре привода с опорным каналом	Т
2	416659	1974 г. № 7	Переменная связь по скорости с опорного канала в управляемый	Д
3	497558	1975 г. № 48	Ввод перекрестных связей и переключаемых необратимых передач	Т
4	498603	1976 г. № 1	Единый опорный канал для силовой и корректирующей систем	Т
5	492850	1975 г. № 43	Двигатели работают без реверса; реверс нагрузки за счет муфт	Д, Н
6	515083	1976 г. № 19	Управление опорным каналом скоростью управляемого канала	Д
7	646848	1977 г. № 6	Специальное формирование управляющего сигнала на оба канала	Б
8	549781	1977 г. № 9	Управление опорным каналом сигналом входной скорости	Т, П
9	550630	1977 г. № 10	Использование силового механического усилителя мощности	Т
10	562792	1977 г. № 23	Ввод расщепленных обратных связей между каналами	Т
11	579596	1977 г. № 41	Использование асинхронного двигателя в качестве опорного канала	Т, П
12	641393	1979 г. № 1	Ввод перекрестных связей и переключаемых необратимых передач	Т
13	647644	1979 г. № 6	Использование дифференциальных частотных датчиков	Т
14	650051	1979 г. № 8	Управление обоими каналами общим сигналом	Б
15	661498	1979 г. № 17	Специальный закон коммутации управляющих сигналов	Б
16	742867	1980 г. № 23	Самонастройка опорного сигнала	Т
17	809050	1981 г. № 8	Применение двигателей поперечного поля	Н
18	425160	1974 г. № 15	Система с раздельной нагрузкой и самонастройкой	Т
19	446027	1974 г. № 37	Система с коррекцией по параметрам механической передачи	Т
20	451050	1974 г. № 43	Включение корректирующего сигнала по специальному алгоритму	Т
21	470785	1975 г. № 18	Система с переключением функций каналов	Б
22	470845	1975 г. № 18	Использование дифференциального частотного датчика	Т
23	479085	1975 г. № 28	Использование дифференциального частотного датчика	Т
24	481876	1975 г. № 31	Переключение функций каналов	Д
25	487345	1975 г. № 37	Система с раздельной нагрузкой и самонастройкой	Т
26	503205	1976 г. № 6	Система с коррекцией по параметрам механической передачи	Т
27	507928	1976 г. № 11	Использование дифференциального частотного датчика	Т
28	516016	1976 г. № 20	Переключение функций каналов	Д
29	533908	1976 г. № 40	Система с коррекцией по косвенно измеряемому моменту	Т
30	541141	1976 г. № 48	Использование двигателя двойного питания	Т, П
31	553590	1977 г. № 13	Система с раздельной нагрузкой и фильтрацией сигналов	Т
32	554532	1977 г. № 14	Двухканальная система с выбором люфта	Т
33	570880	1977 г. № 32	Применение дифференциального частотного датчика	Т
34	572754	1977 г. № 34	Система с коррекцией по измеренному передаточному числу	Т
35	648942	1979 г. № 7	Переключение функций каналов	Т, П

При отсутствии входного сигнала СДПОК $\Theta_1(t)$ ОК за счет опорного сигнала $U_{оп}$ с источника опорного сигнала ИОС обеспечивает вращение с постоянной скоростью Ω_0 , а УК за счет сигнала $\Delta U = U_{оп} - U_{ос}$, подаваемого через корректирующее звено (КЗ), — вращение со встречной скоростью $\Omega_y = \Omega_0$, нагрузка Н неподвижна, разность

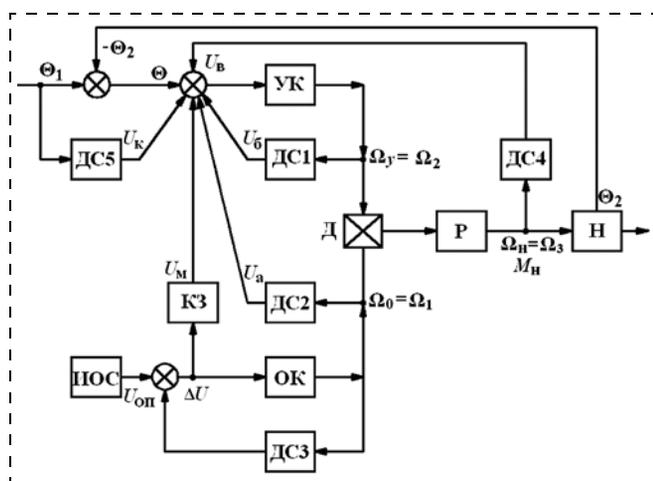


Рис. 7. Структура СДПОК с перекрестными связями

сигналов, вырабатываемых датчиками скорости ДС1, ДС2: $U = U_a - U_b = 0$.

При наличии входного сигнала $\Theta_1(t)$ и наличии сигналов $U_k, U_b, \Theta = \Theta_1 - \Theta_2$ скорость $\Omega_y \neq \Omega_0$. Учет сигналов U_a, U_b, U_b реализует обратную связь, уменьшающую их влияние на динамику СДПОК. Полагая, что скорость ОК изменяется лишь под действием нагрузочных моментов, можно считать, что изменение ΔU вызывается лишь их изменением, а следовательно, после обработки его можно использовать в КЗ в качестве сигнала, компенсирующего влияние момента на точность работы УК.

На рис. 8, 9 представлены структура и диаграммы работы СДПОК (авторское свидетельство на изобретение 492850), в котором энергия к нагрузке передается от двигателя ИД, а в ряде режимов работы — непосредственно от первичного тягового или приводного двигателя ПД (например, электромашинного усилителя) через редукторы Р1, Р2, дифференциал Д с помощью электромагнитных муфт ЭМ1, ..., ЭМ4. Скорость Ω_y управляемого канала УК формируется от ИД, а скорость Ω_0 опорного канала — от ПД. Управление муфтами осуществляется от логического устройства ЛУ, работающего по компенсирующему сигналу U_k и сигналу

ошибки $\Theta = \Theta_1 - \Theta_2$. На схеме и диаграмме обозначения I, II, III, IV соответствуют номерам соответствующих валов привода и графиков скоростей их вращения.

Пусть входная скорость СДПОК $\Omega_1(t) = d\Theta_1/dt$ изменяется по закону $\Omega_1(t) = \Omega_{1m} \sin \omega t$ (рис. 9, а). При $t = 0$ под воздействием сигналов с ЛУ сраба-

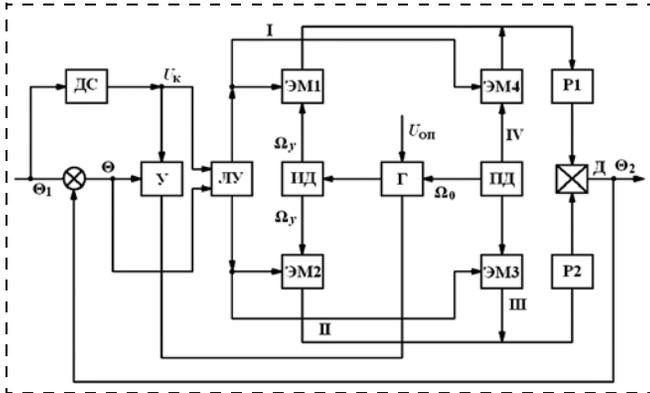


Рис. 8. Структура СДПОК с формированием опорного канала от первичного двигателя

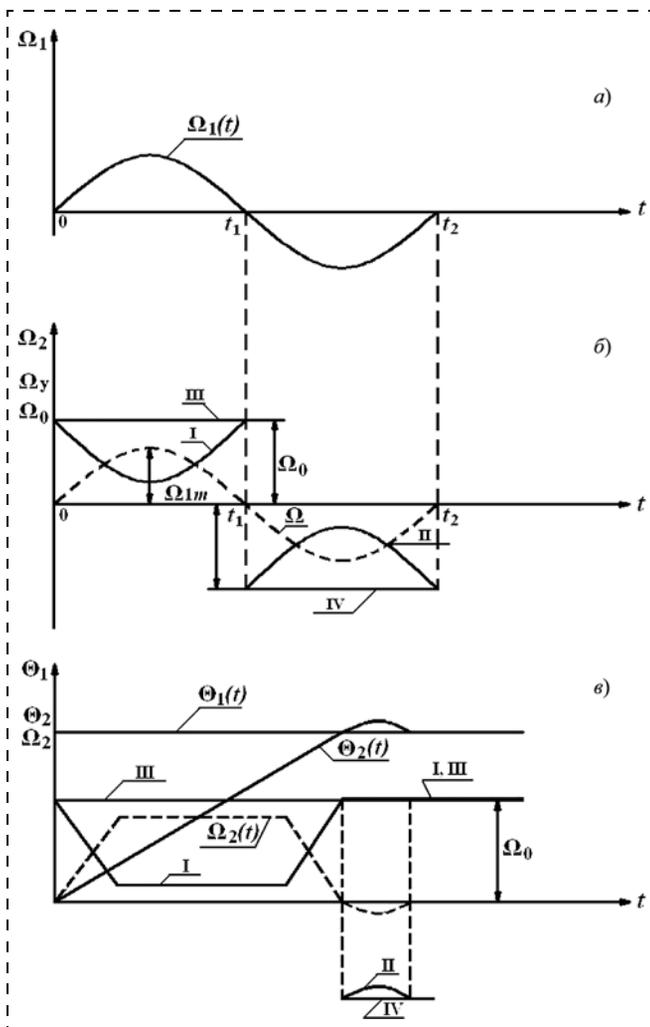


Рис. 9. Диаграммы работы СДПОК переключением электромагнитных муфт

тывают ЭМ1, ЭМ3. Движение со скоростью Ω_0 от ПД и движение со скоростью $\Omega_y = \Omega_0$ от ИД передаются, соответственно, через Р2, Д и Р1, Д к нагрузке, которая при $\Omega_y = \Omega_0$ неподвижна. При $t > 0$ вал III вращается со скоростью Ω_0 , а вал I — по закону $\Omega_2(t) = \Omega_0 - \Omega_{1m} \sin \omega t$ (рис. 9, б). В момент $t = t_1$ срабатывают ЭМ2, ЭМ4, движения передаются валам IV, II. При $t_2 > t > t_1$ вал II вращается по закону $\Omega_2(t) = -\Omega_0 + \Omega_{1m} \sin \omega t$, а вал IV — со скоростью Ω_0 (рис. 9, б).

На рис. 9, в представлена обработка СДПОК ступенчатого воздействия $\Theta_1(t) = A \cdot 1(t)$ большой величины ($A = \text{const}$), когда усилитель У привода работает в режиме насыщения.

Даже краткое рассмотрение только двух структур СДПОК показывает большие возможности для их дальнейшего совершенствования и использования в самых экзотических условиях и режимах работы.

Заключение

В настоящее время разработано достаточно много структур СДПОК, защищенных авторскими свидетельствами на изобретения. Опубликовано ряд работ по теории анализа и синтеза таких приводов. Но широкого практического использования их пока нет. Это, по мнению автора, вызвано прежде всего тем, что большинство работ теоретического характера опубликовано в узконаправленных ведомственных изданиях, ограниченных для использования. На устранение этого обстоятельства и направлена прежде всего эта работа, в которой:

- дан обзор основных опубликованных по СДПОК теоретических работ и изобретений;
- представлены рекомендации по выбору основных параметров и элементов силовой части СДПОК;
- показаны богатые возможности структурного построения СДПОК.

Список литературы

1. Школьников Б. М., Суд И. И. Буровой автоматический регулятор типа БАР-150 // Энергетический бюллетень М.: 1954. № 7.
2. Школьников Б. М., Суд И. И. Некоторые свойства и расчет системы многодвигательного привода с механическим дифференциалом // Электричество. 1958. № 6.
3. Moore I. R. Combination open-cycle closed-cycle Systems RIRE, 2.39. 1951. N. 11.
4. Гудков В. С. Переходные процессы в приводах с механическим дифференциалом // Электричество. 1956. № 10.
5. Марголин Ю. М. Дифференциальный электропривод. М.: Энергия, 1975.
6. Ефимов И. Г. Дискретная система электропривода с широким диапазоном регулирования скорости. Л.: ЛДНТ, 1969. 20 с.
7. Новоселов Б. В., Бушенин Д. В., Кузнецов В. А., Носатов С. П. Проектирование следящих приводов с дифференциальными исполнительными механизмами. Владимир: ОСНТО, 1981. 165 с.
8. Новоселов Б. В. Двухканальный следящий привод с силовым опорным каналом. Аналитический обзор за 1942—1990 гг. № 5428 / М.: НТЦ "Информатика", 1991. 117 с.
9. Кузнецов Б. И., Новоселов Б. В., Богаенко И. Н., Рюмшин Н. А. Проектирование многоканальных систем оптимального управления. Киев: Техніка, 1993. 245 с.

Parametric and Structural Potential of Differential Servodrives with a Reference Channel

The paper considers a high potential of variable servodrives with a reference channel (VSDRC). Load rotation speed of these drives is to be determined by means of subtraction of a reference channel constant speed and controlled channel varying speed on a mechanical differential. The abilities to vary parameters and structural-layout design of the whole drive are increased owing to a data interchange between the controlled and reference channels. In relation to static modes of operation, special guidelines have been worked out on the choice of the reference speed level, estimation of the attainable control range, permissible unevenness of servomotors rotation and drive limiting potential on speed regulation accuracy.

An overview is given of basic published papers reporting this category of servodrives. In particular, 35 inventions referring to this category of drives are presented in a table form, these inventions being developed by the author and his colleagues. Along with merits, the following to-be-investigated problems have been indicated: elimination of a negative dynamic channels interference, simplification of drive power kinematic targets, etc.

Keywords: differential servodrive with a reference channel, reference and controlled channels, control range, invariance

References

1. Shkol'nikov B. M., Sud I. I. Burovoy avtomaticheskii regulyator tipa BAR-150. *Energeticheskii byulleten'*. 1954. N. 7.
2. Shkol'nikov B. M., Sud I. I. Nekotorye svoystva i raschet sistemy mnogodvigatel'nogo privoda s mekhanicheskim differentsialom. *Elektrichestvo*. 1958. N. 6.
3. Moore I. R. Combination open-cycle closed-cycle Systems RIRE, 2.39. 1951. N. 11.
4. Gudkov V. S. Perekhodnye protsessy v privodakh s mekhanicheskim differentsialom. *Elektrichestvo*. 1956. N. 10.
5. Margolin Yu. M. Differentsial'nyy elektroprivod. M.: Energiya, 1975.
6. Efimov I. G. Diskretnaya sistema elektroprivoda s shirokim diapazonom regulirovaniya skorosti. L.: LDNT, 1969. 20 p.
7. Novoselov B. V., Bushenin D. V., Kuznetsov V. A., Nosatov S. P. Proektirovanie sledyashchikh privodov s differentsial'nymi ispolnitel'nymi mekhanizmami. Vladimir: OSNTO, 1981. 165 p.
8. Novoselov B. V. Dvukanal'nyy sledyashchiy privod s silovym opornym kanalom. Analiticheskii obzor za 1942—1990 gg. № 5428. M.: NTTs "Informatika", 1991. 117 p.
9. Kuznetsov B. I., Novoselov B. V., Bogaenko I. N., Ryumshin N. A. Proektirovanie mnogokanal'nykh sistem optimal'nogo upravleniya. Kiev: Tekhnika, 1993. 245 p.

УДК 681.51; 532.516.5

И. Ш. Насибуллаев, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., sp.ishn@gmail.com,

Э. Ш. Насибуллаева, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., elvira@anrb.ru,

Е. В. Денисова, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., denisova@anrb.ru,

Институт механики им. П. П. Мавлютова Уфимского научного центра Российской академии наук

Влияние различных видов силы трения в системе двух коаксиальных цилиндров

Рассматривается техническое устройство, состоящее из двух коаксиальных цилиндров, в котором внешний цилиндр неподвижен, а внутренний движется под действием перепада давления, приложенного к его торцам. Впервые исследуется влияние на движение внутреннего цилиндра двух видов трения — сухого трения, возникающего при взаимодействии стенок цилиндров, и вязкого трения, возникающего при течении вязкой жидкости в зазоре между цилиндрами. Показана необходимость учета различия в значениях максимальной силы трения покоя и силы трения скольжения. Определено, что сила вязкого трения оказывает небольшое влияние на динамику движения внутреннего цилиндра, а режим течения в зазоре сильно зависит от ширины самого зазора. Проведена оценка динамических свойств технического устройства как элемента системы управления.

Ключевые слова: система автоматического управления, техническое устройство, сервопоршень, гидродинамика, уравнения Навье—Стокса, коаксиальные цилиндры, сухое трение, вязкое трение

Введение

В системах автоматического управления (САУ) различными техническими объектами чаще всего используются конструкции с двумя вложенными друг в друга коаксиальными цилиндрами (поршень с обечайкой, гидроцилиндры направляющих аппаратов компрессора или створок сопла). Схематично подобная конструкция представлена на рис. 1.

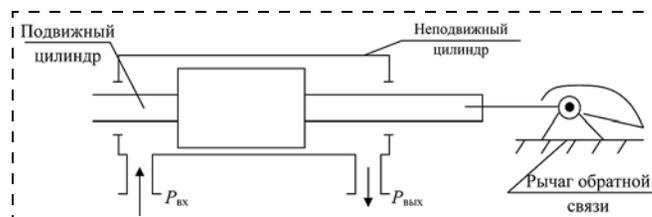


Рис. 1. Схема гидравлического усилителя для проточной части двигателя

Перемещение одного цилиндра в другом может осуществляться несколькими способами:

- за счет перепада давлений на торцах внутреннего цилиндра (примером может быть сервопоршень дроссельной иглы);
- за счет приложенной внешней силы (например, гидроцилиндры в регуляторах проточной части двигателя — компрессора или сопла).

В любом случае данные конструкции содержат элементы, функционирующие в потоке жидкости (топливе), которая, как правило, перетекает из одной полости в другую. В свою очередь, наличие жидкой прослойки влияет на скорость внутреннего цилиндра, которая может зависеть от скорости течения жидкости в зазоре. Однако до настоящего времени не проводили исследования движения жидкости в слое между коаксиальными цилиндрами в случае, когда внешний цилиндр покоится, а внутренний движется параллельно ему под действием градиента давления. Тем более были оценены динамические свойства подобного элемента, входящего в состав исполнительной части системы управления силовой установкой. Близки к данной задаче исследования, представленные в работе [1], в которой рассматривалась задача только о прямолинейном течении между двумя цилиндрами, когда внутренний цилиндр либо покоится, либо движется поступательно с заданной скоростью. Таким образом, исследование течения жидкости в зазоре между движущимися и/или неподвижными элементами является *актуальной задачей*, возникающей при проектировании технических устройств, составной частью которых является элемент, работающий в движущемся потоке жидкости.

При проектировании САУ силовой установкой, как правило, использовались два вида управления [2, 3]:

1) управление сил на подвижном цилиндре. Математически данное управление описывалось нелинейной системой дифференциальных уравнений, описывающих баланс сил на подвижном элементе (второй закон Ньютона), причем с учетом только силы сухого трения, значение которой принималось постоянным;

2) управление Бернулли для расчета расходов топлива. Математически такое управление описывалось уравнением (интегралом) Бернулли для стационарного потока идеальной несжимаемой жидкости, где для учета течения реальной жидкости вводятся слагаемые, учитывающие потери на местные и распределенные сопротивления.

Подобный подход приводил к существенным ошибкам, что затягивало сроки проектирования САУ.

С точки зрения трибологии различают различные виды трения, прежде всего, *сухое* и *вязкое* трение [4]. Трение между твердыми элементами определяется коэффициентом сухого трения — коэффициентом пропорциональности между силой трения и силой нормальной реакции на границе элементов (закон Амонтона—Кулона). При наличии жидкой фазы

(в нашем случае — при наличии жидкой прослойки между элементами конструкции) необходимо учитывать вязкое трение через коэффициент динамической вязкости, связывающий силу вязкого трения и произведение площади контакта и нормального градиента скорости вблизи поверхности. Для этого необходимо решать гидродинамическую задачу течения жидкости в зазоре [5]. При этом поскольку течение жидкости может быть не стационарным, сама жидкость является вязкой и сжимаемой, а, как показывает практика, уравнение Бернулли даже с учетом поправочных коэффициентов не дает корректного описания процесса, моделирование необходимо проводить с помощью уравнений Навье—Стокса, описывающих движение ньютоновской жидкости.

Целями данной работы являются:

- исследование влияния различных видов сил трения на движение внутреннего цилиндра;
- определение условия, когда кривизной трубы можно пренебречь и свести гидродинамическую задачу к плоскому параллельному течению жидкости с комбинированным паузейлевским и сдвиговым (с одной фиксированной и одной инертной границей) течениями;
- оценка динамических свойств технического устройства как элемента системы управления.

1. Постановка задачи и основные уравнения

Рассматривается движение цилиндра конечной длины L , радиуса r_1 и массой m внутри цилиндра бесконечной длины, радиуса $r_2 = r_1 + h$ (здесь h — зазор между цилиндрами), заполненного жидкостью плотности ρ и динамической вязкости μ , под действием периодического по времени перепада давления $\Delta p g(t)$ (рис. 2, а), где $\Delta p = (p_1 - p_2)$ — амплитуда

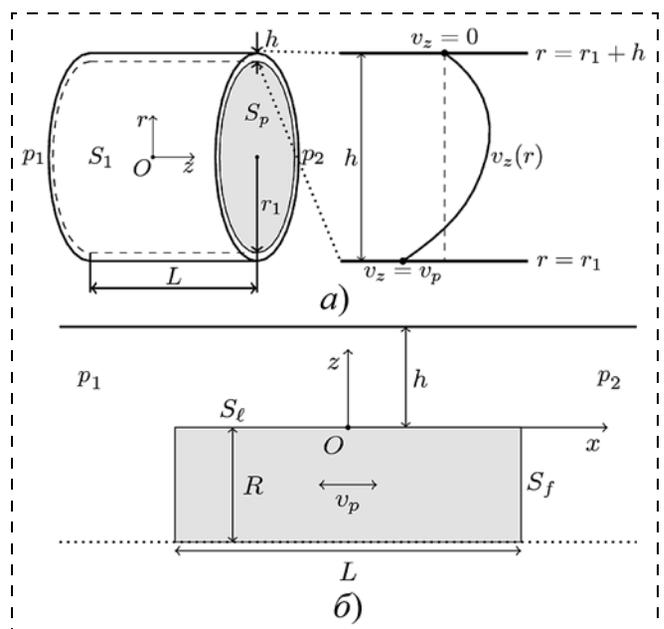


Рис. 2. Геометрия задачи в цилиндрических (а) и декартовых (б) координатах

перепада давления; p_1 и p_2 — значения давлений слева и справа от внутреннего цилиндра соответственно; $g(t)$ — периодическая функция ($-1 \leq g(t) < 1$); $\omega = 2\pi f$, f — частота колебаний давления.

Начало цилиндрической системы координат помещается на оси в центре внутреннего цилиндра. Координаты в радиальном, окружном и осевом направлениях обозначены через r , φ и z , а соответствующие компоненты скорости течения жидкости — v_r , v_φ и v_z . Скорость движения внутреннего цилиндра имеет только одну компоненту v_p вдоль оси z .

Уравнение движения поршня описывается вторым законом Ньютона:

$$mv_{p,t}(t) = S_p \Delta p g(t) - F(v_p) - \mu S_1 v_z, r(r, t)_{r=r_1}, \quad (1)$$

где введено обозначение для частной производной $f_{,x} = \partial f / \partial x$; S_p — площадь поперечного сечения внутреннего цилиндра; $S_1 = 2\pi r_1 L$ — площадь внешней поверхности внутреннего цилиндра. Сила сухого трения $F(v_p) = F_f \operatorname{sgn}(v_p)$, где F_f — модуль силы трения. Последнее слагаемое уравнения (1) описывает силу вязкого трения:

$$F_v = \tau S_1 = \mu S_1 \left. \frac{\partial v_z(r, t)}{\partial r} \right|_{r=r_1},$$

где τ — напряжение внутреннего цилиндра на поверхности. Отметим, что при рассмотрении сухого трения последнее слагаемое в (1) берется равным нулю, а при рассмотрении вязкого трения — среднее слагаемое в (1) обнуляется.

Координата внутреннего цилиндра z_p описывается уравнением

$$z_{p,t}(t) = v_p(t). \quad (2)$$

Движение жидкости описывается уравнением неразрывности для несжимаемой жидкости и уравнением Навье—Стокса [3]:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \rho[\mathbf{v},_t + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v}] = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{v}, \quad (3)$$

где ∇ — оператор набла; Δ — оператор Лапласа; ∇p — градиент давления.

Пренебрегая краевыми эффектами, получим $v_z = v_z(r, t)$. Поскольку течение является осесимметричным, и не рассматривается осевое вращение внутреннего цилиндра, компонента скорости $v_\varphi = 0$. Из уравнения неразрывности получим, что и радиальная компонента скорости $v_r = 0$. Таким образом, рассматриваемое течение жидкости соответствует нестационарному параллельному течению, и уравнение Навье—Стокса (3) запишется в виде

$$\rho v_{z,t} = -p_{,z} + \mu \left(v_{z,rr} + \frac{1}{r} v_{z,r} \right), \quad (4)$$

где градиент давления $p_{,z} = (\Delta p / L) g(t)$.

Граничные условия на поверхностях внутреннего ($r = r_1$) и внешнего ($r = r_2 = r_1 + h$) цилиндров определяются из условия залипания:

$$v_z(t, r_1) = v_p(t), v_z(t, r_2) = 0. \quad (5)$$

Начальные условия для внутреннего цилиндра определяются как

$$z_p(0) = 0, z_{p,t}(0) = 0$$

при максимальном значении перепада давления ($g(0) = 1$).

Для исследования системы проведем безразмеривание уравнений. В качестве характерного размера выберем ширину зазора h , а для безразмерного времени выберем обратную частоту потока ω^{-1} . Тогда размерные величины примут следующий вид (безразмерные величины записаны со звездочками):

$$z = h z^*, r = h r^*, t = \omega^{-1} t^*.$$

Опуская звездочки, запишем безразмерную систему:

$$\begin{aligned} v_{z,t} &= a_p g(t) + a_f (v_{z,rr} + r^{-1} v_{z,r}), \\ v_{p,t} &= b_p g(t) - b_f \operatorname{sgn}(v_p) - b_v v_z, r(r=r_1), z_{p,t} = v_p, \end{aligned} \quad (6)$$

где $a_p = \frac{\Delta p}{L} \frac{1}{\rho h \omega^2}$ — амплитуда давления для жид-

кости; $a_f = \frac{1}{\operatorname{Re}} = \frac{\mu}{\rho h^2 \omega}$; $\operatorname{Re} = \frac{\rho h^2 \omega}{\mu}$ — число Рей-

нольдса; $b_p = \frac{\Delta p}{L} \frac{1}{\rho_p h \omega^2} = a_p \frac{\rho}{\rho_p}$ — амплитуда дав-

ления для внутреннего цилиндра; ρ_p — плотность материала внутреннего цилиндра; $b_f = \frac{F_f}{\rho_p S_p L h \omega^2}$ —

сила сухого трения; $b_v = \frac{2\mu}{\rho_p r_1 h \omega^2} = \frac{1}{\operatorname{Re}} \frac{2}{r_1} \frac{\rho}{\rho_p}$ — ве-

личина, характеризующая силу вязкого трения. Величины, характеризующие материальные параметры и геометрию системы, размерны.

2. Сравнение с плоским параллельным движением

Уравнения движения внутреннего цилиндра представляют собой плоскую двумерную задачу. Проведем сравнение этих уравнений с плоским параллельным течением в декартовой системе координат (течение в плоском канале с подвижной границей) для того, чтобы определить параметры, при которых кривизной внешнего цилиндра можно пренебречь. Начало декартовой системы координат помещено на поверхности внутреннего цилиндра, ось Ox — вдоль движения внутреннего цилиндра, ось Oz — перпендикулярно движению внутреннего цилиндра (рис. 2, б). Течение индуцируется приложенным вдоль слоя перепадом давления $p(t) = \Delta p g(t)$.

Система уравнений, описывающая динамику жидкости и внутреннего цилиндра в безразмерном виде (характерный размер — h ; характерное время — ω^{-1}), примет вид

$$\begin{aligned} v_{x,t} &= a_p g(t) + a_f v_{x,zz}; \\ v_{p,t} &= b_p g(t) - b_f \operatorname{sgn}(v_p) - b_v v_{x,z}(z=0); \\ x_{p,t} &= v_p, \end{aligned} \quad (7)$$

где коэффициенты a_i , b_i ($i = \{p, f\}$) и b_v совпадают с соответствующими коэффициентами для цилиндрической системы координат с учетом обозначений $R = r_1$, $S_l = S_1$ и $S_f = S_p$ и обозначения оси Oz через Or . Уравнение Навье—Стокса в цилиндрической геометрии содержит дополнительное слагаемое в правой части, учитывающее кривизну внешнего цилиндра:

$$a_f r^{-1} v_{z,r} \quad (8)$$

Таким образом, задачу в цилиндрической системе координат можно свести к плоскому параллельному течению в декартовой системе координат, когда слагаемое (8) не вносит существенного вклада в уравнение Навье—Стокса, т. е. при $v_{z,rr} \gg r^{-1} v_{z,r}$ или при $a_f \ll a_p$. Для типичных параметров системы и большой амплитуды градиента давления ($\Delta p \sim 10^3$ Па) последнее условие выполняется в моменты времени, когда $|g(t)| \leq a_f/a_p \sim 10^{-6}$ (во время пренебрежимо малой доли периода перепада давления).

3. Численная реализация

Уравнения (6) с граничными условиями (5) записывали с помощью метода конечных разностей и решали численно методом Ньютона. Уравнение Навье—Стокса представляли в виде численной схемы Кранка—Николсон:

$$\begin{aligned} \frac{v_z^{j+1;i} - v_z^{j;i}}{\Delta t} &= a_p f(t^j) + \frac{a_f}{2\Delta h^2} (v_z^{j+1;i+1} - 2v_z^{j+1;i} + \\ &+ v_z^{j+1;i-1} + v_z^{j;i+1} - 2v_z^{j;i} + v_z^{j;i-1}) + \\ &+ \frac{a_f}{4\Delta h r^i} (v_z^{j+1;i+1} - v_z^{j+1;i-1} + v_z^{j;i+1} - v_z^{j;i-1}), \end{aligned}$$

где индекс i соответствует i -му узлу по координате и j соответствует j -му узлу по времени; Δt и Δh — шаг по времени и координате соответственно.

Уравнения движения внутреннего цилиндра можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{v_p^{j+1} - v_p^j}{\Delta t} &= b_p f(t^j) - b_v v_{z,r}|_{r=r_1} - b_f \operatorname{sgn}(v_p^j); \\ \frac{z_p^{j+1} - z_p^j}{\Delta t} &= v_p^j. \end{aligned}$$

Уравнение движения внутреннего цилиндра решали с помощью метода Рунге—Кутты 4-го порядка, а уравнение на скорость внутреннего цилиндра — методом Эйлера.

После записи дифференциальных уравнений через конечные разности получается система алгебраических уравнений, в которой, после дополнения первым граничным условием (5) в виде $v_z^{j=0;i} = v_p^j$, связываются переменные v_z и v_p . Для получения установившегося периодического течения методом Ньютона, с использованием явной схемы по коор-

динатам, необходимо просчитать несколько полных периодов с очень малым шагом по времени (для обеспечения точности по координате и сходимости схемы). Для оптимизации численной схемы была выбрана неявная схема по координате, и на каждом временном шаге решение находилось с помощью итерационного метода Ньютона—Рафсона. Погрешность вычислений не превышала 1 % при разбиении сетки по координате на 50 узлов и 10^5 шагов по времени за 1 с.

4. Результаты моделирования

Расчеты проводили для следующих параметров: $r_1 = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $h = r_1/50$, $L = 10^{-2}$ м, плотность внутреннего цилиндра $\rho_p = 2700$ кг/м³, $\rho = 780$ кг/м³, $\mu = 1,5 \cdot 10^{-3}$ Па·с, амплитуда перепада давления $\Delta p = 10^3$ Па. Параметры для материала внутреннего цилиндра соответствуют параметрам алюминия, а для жидкости — керосина (РТ [6] при температуре 20 °С). В качестве функции внешнего перепада давления задавали периодическую во времени функцию $g(t) = \cos t$. Результаты представлены для размерных величин (для скорости и расстояния) и безразмерного времени (период T равен 2π).

При движении внутреннего цилиндра при отсутствии трения его уравнение движения примет вид $v_{p,t} = b_p \cos t$, а решение для скорости — $v_p = v_{p0} + b_p \cos(t + \phi)$, где ϕ — сдвиг фазы между перепадом давления (серая линия на рис. 3, а) и скоростью цилиндра (черная сплошная линия на рис. 3, а) не меняется со временем и составляет 0,25 периода T ($\phi = T/4$). Движение является периодическим с момента начала движения.

Увеличение сухого трения уменьшает сдвиг фазы ϕ , а также амплитуду скорости движения внутреннего цилиндра (рис. 3, а). Когда модуль силы перепада давления $|b_p g(t)|$ меньше силы трения покоя F_f , скорость внутреннего цилиндра падает до нуля и цилиндр покоится. Отметим несимметричность возрастания и убывания модуля скорости. Это связано с тем, что при неподвижном внутреннем цилиндре, когда $|b_p g(t)| < F_f$, перепада давления недостаточно для того, чтобы его сдвинуть; когда перепад давления $|b_p g(t)| > F_f$, скорость растет; когда $|\Delta p(t)| = F_f$, скорость достигает своего максимума и начинает быстро убывать за счет трения за время, меньшее, чем время выполнения условия $|b_p g(t)| > F_f$.

Рассмотрим, как влияет различие между максимальной силой трения покоя F_f и силой трения скольжения F_g на динамику движения внутреннего цилиндра. Обычно эти силы связаны соотношением $F_g = n_f F_f$, где $0 < n_f < 1$. На рис. 3, б показана зависимость скорости движения цилиндра от времени для силы трения покоя $F_f = 7$ Н и коэффициента $n_f = 0,95$. Видно, что даже незначительное уменьшение силы трения скольжения F_g (на 5 %) приводит к росту промежутка времени движения внутреннего цилиндра и значительному росту его

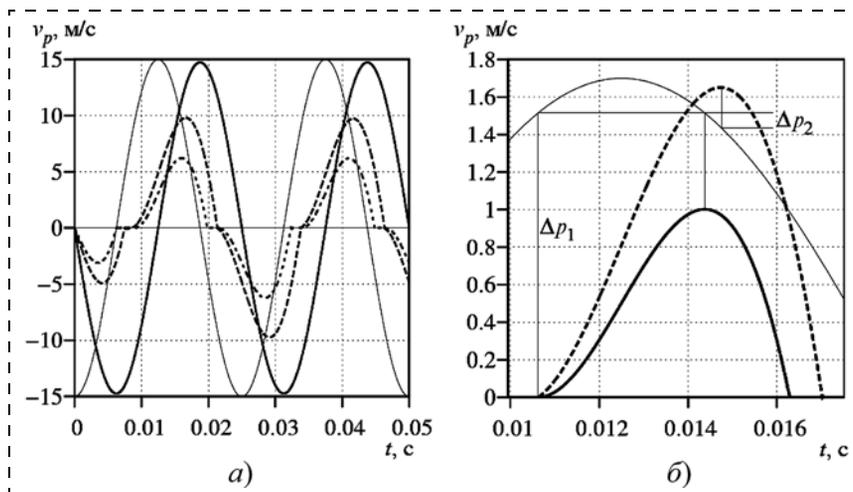


Рис. 3. Скорость внутреннего цилиндра v_p от времени t : а — при отсутствии (—) и наличии сухого трения $F_f = 4$ Н (---) и $F_f = 5$ Н (-.-.); б — при сухом трении $F_f = 7$ Н: (—) $n_f = 1$; (---) $n_f = 0,95$

максимальной скорости (на 65 %). Отметим, что при $F_g = F_f$ начало движения цилиндра и уменьшение абсолютного значения v_p приходится на одно и то же значение перепада давления Δp_1 (определяемое из баланса $|b_p g(t)| = F_f$). При $F_g = n_f F_f$ ($n_f < 1$) момент начала движения не изменяется (так как определяется максимальной силой трения покоя F_f), а уменьшение модуля скорости соответствует условию $|b_p g(t)| = F_g = n_f F_f < F_f$ (т. е. при перепаде давления $\Delta p = \Delta p_1 - \Delta p_2$, где $\Delta p_2 = [1 - n_f] \Delta p_1$), что увеличивает продолжительность времени движения внутреннего цилиндра. Таким образом, учет реальных значений сил трения F_f и F_g является существенным.

При наличии вязкого трения характер движения внутреннего цилиндра меняется незначительно (для рассматриваемых параметров системы ~2 %). Однако на характер самого течения существенное влияние оказывает ряд факторов. При уменьшении ширины зазора диапазон изменения скорости жидкости уменьшается. На рис. 4 показаны зависимости скорости жидкости в середине зазора

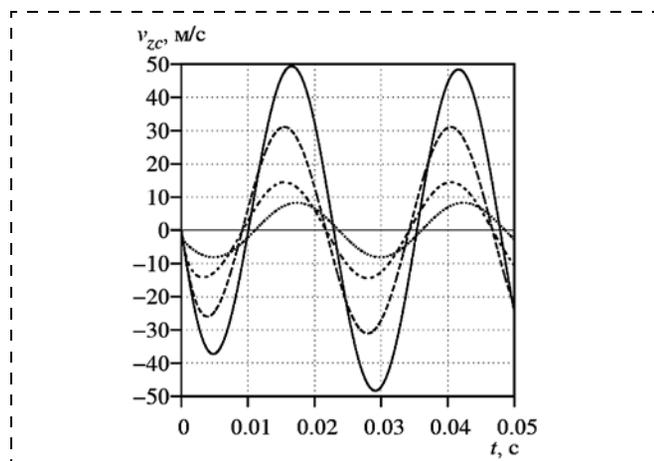


Рис. 4. Зависимость скорости жидкости в центре зазора v_{zc} от времени t для $h = r_1/20$ (—); $h = r_1/30$ (---); $h = r_1/50$ (-.-.) и $h = r_1/100$ (....)

$v_{zc} = v_z(z = r_1 + h/2, t)$ от времени. С уменьшением ширины зазора также меняется сдвиг фазы между скоростью v_{zc} и перепадом давления $g(t)$. Это объясняется тем, что течение жидкости имеет две составляющие — сдвиговую (в результате движения цилиндра) и пуазейлевскую (в результате приложенного к зазору перепада давления). С уменьшением ширины зазора пуазейлевская составляющая уменьшается, а сдвиговая остается практически неизменной, т. е. характер течения жидкости определяется движением внутреннего цилиндра. Дальнейшее уменьшение ширины зазора слабо меняет зависимость $v_{zc}(t)$, поскольку сдвиговая составляющая скорости становится преобладающей.

На рис. 5 показаны профили скорости жидкости в различные моменты периода. В зависимости от скорости внутреннего цилиндра преобладает либо сдвиговая составляющая течения (когда цилиндр движется с большой скоростью), либо пуазейлевская (в моменты времени, когда скорость цилиндра мала).

Расчеты проводили для безразмерной системы уравнений (6), и полученные результаты остаются неизменными для определенных наборов параметров. Решение для течения жидкости остается инвариантным при сохранении числа Рейнольдса (т. е. при $\mu/(\rho h^2 \omega) = \text{const}$) и выполнении соотношения $(\Delta p/L)h/(\mu \omega) = \text{const}$. Решение для движения внутреннего цилиндра с сухим трением остается инвариантным при выполнении условия $b_p = \text{const}$ и $F_f = \text{const}$.

Отметим, что течение при больших числах Рейнольдса становится неустойчивым [7], что может существенно увеличить вклад в силу вязкого трения и, таким образом, повлиять на характер движения

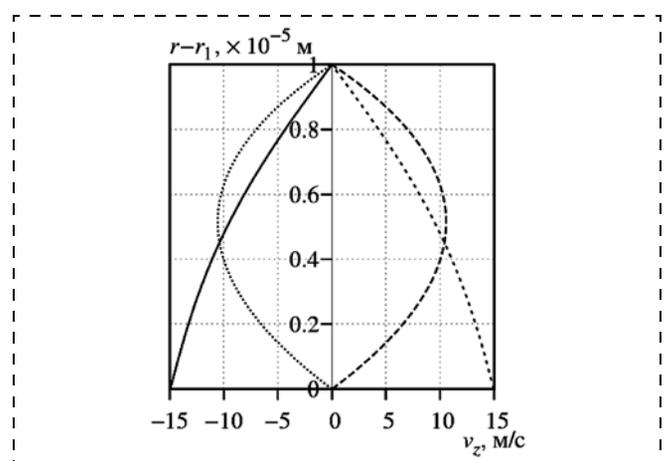


Рис. 5. Профили $r - r_1$ установившегося течения жидкости v_z при ширине зазора $h = r_1/50$ в моменты периода $t = T/4$ (—); $t = T/2$ (---); $t = 3T/4$ (-.-.) и $t = 2T$ (....)

внутреннего цилиндра. Высокие перепады давления для двухфазных жидкостей могут привести к образованию кавитационной неустойчивости [8]. Данные явления планируется детально изучить при дальнейшей работе.

Кроме того, полученные данные позволяют сделать вывод, что существовавшее до настоящего времени описание динамических процессов в гидроцилиндре как интегрального звена (реального и, чаще, идеального) может быть достаточно справедливым только для одной конкретной точки. Поэтому рассматривая множество режимов работы САУ силовой установкой, необходимо учитывать динамику элемента как сложного нелинейного звена.

Заключение

В работе было проведено исследование движения цилиндра внутри цилиндра большего радиуса под действием периодического перепада давления с учетом сухого или вязкого трения. Было показано следующее:

- сила сухого трения существенно влияет на движение внутреннего цилиндра;
- необходимо учитывать различие в значениях силы трения скольжения и максимальной силы трения покоя;
- с уменьшением ширины зазора вклад паузейлевской составляющей течения жидкости уменьшается и преобладает сдвиговая составляющая;

- техническое устройство как элемент системы необходимо рассматривать как существенно нелинейный.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-01-97019-р_поволжье_а, 14-08-97027-р_поволжье_а) и Программы № 1 фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН "Научные основы робототехники и мехатроники".

Список литературы

1. **Петросян Л. Г.** Несимметричная модель прямолинейного течения жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами // Известия НАН Армении. Механика. 1998. Т. 51, № 1. С. 63–71.
2. **Некрасов Б. Б.** Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах: учебник. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 368 с.
3. **Матвеевко А. М., Акопов М. Г., Волков А. А.** и др. Методы проектирования перспективных энергосистем силового привода летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 312 с.
4. **Сивухин Д. В.** Общий курс физики. Т. I. Механика. М.: Наука, 1979. 520 с.
5. **Денисова Е. В., Насибуллаева Э. Ш., Насибуллаев И. Ш.** Исследование динамических процессов в элементах топливной автоматики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 5 (158). С. 31–36.
6. **ГОСТ 10227–86.** Межгосударственный стандарт. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2008.
7. **Дразин Ф.** Введение в теорию гидродинамической устойчивости. М.: Физматлит, 2005. 287 с.
8. **Кнепп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф.** Кавитация. М.: Мир, 1974. 668 с.

I. Sh. Nasibullayev, Researcher, sp.ishn@gmail.com,
E. Sh. Nasibullaeva, Senior researcher, elvira@anrb.ru,
E. V. Denisova, Leading researcher, denisova@anrb.ru,
Mavlutov Institute of Mechanics, Ufa

Influence of Different Types of Friction Forces in the Two Coaxial Cylinders

The technical device consisting of two coaxial cylinders, in which the outer cylinder is fixed and the internal one moves under the differential pressure applied to its ends is considered. For the first time the influence on the motion of the inner cylinder of the two types of friction (dry friction arising from the interaction of cylinder walls and viscous friction that occurs when a viscous fluid flows in the gap between the cylinders) is investigated. The necessity of taking into account the differences in the values of the maximum force of the static friction and the force of the sliding friction is shown. It is found that the viscous friction has little effect on the dynamics of the inner cylinder and the flow regime in the gap is strongly dependent on the width of the gap. The estimation of the dynamic properties of a technical device as an element management system has been made.

Keywords: automatic control system, technical device, servopiston, hydrodynamics, Navier–Stokes equations, coaxial cylinders, dry friction, viscous friction

References

1. **Petrosyan L. G.** Nesimmetrichnaya model' pryamolinyynogo techeniya zhidkosti mezhdru dvumya koaksial'nymi tsilindrami. *Izvestiya NAN Armenii. Mekhanika*. 1998. V. 51, N. 1. P. 63–71.
2. **Nekrasov B. B.** Gidravlika i ee primeneniye na letatel'nykh apparatakh: uchebnyk. M.: EKOLIT, 2011. 368.
3. **Matveenko A. M., Akopov M. G., Volkov A. A.** i dr. Metody proektirovaniya perspektivnykh energosistem silovogo privoda letatel'nykh apparatov. M.: Izd-vo MAI-PRINT, 2010. 312 p.
4. **Sivukhin D. V.** Obshchiy kurs fiziki. T. I. Mekhanika. M.: Nauka, 1979. 520 p.

5. **Denisova E. V., Nasibullaeva E. Sh., Nasibullaev I. Sh.** Issledovanie dinamicheskikh protsessov v elementakh toplivnoy avtomatiki. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2014. N. 5 (158). P. 31–36.
6. **GOST 10227–86.** Mezhdgosudarstvennyy standart. Topliva dlya reaktivnykh dvigateley. Tekhnicheskie usloviya. M.: Standartinform, 2008.
7. **Drazin F.** Vvedeniye v teoriyu gidrodinamicheskoy ustoychivosti. M.: Fizmatlit, 2005. 287 p.
8. **Knepp R., Deyli Dzh., Khemmit F.** Kavitatsiya. M.: Mir, 1974. 668 p.



ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БАРАНОВ Л. А.
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.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ХИМЕНКО В. И.
ЧЕБУРАХИН И. Ф.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Солдаткин В. В.

Особенности реализации и характеристики системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэротрихического приемника. 61

Колесниченко С. В.

Разработка методологии обоснования требований к точности чувствительных элементов комплексированных систем управления летательных аппаратов 67

В. В. Солдаткин, канд. техн. наук, доц., haibulova.piis@kstu-kai.ru,
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ

Особенности реализации и характеристики системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника

Рассматриваются особенности построения, формирования и обработки информативных сигналов, приводятся результаты трубных испытаний экспериментального образца системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника и информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта.

Ключевые слова: вертолет, воздушные сигналы, измерение, система, неподвижный многофункциональный приемник, особенности реализации, экспериментальный образец, трубные испытания, характеристики

Введение

В народном хозяйстве страны, а также в военных целях широкое применение находят вертолеты различных классов и назначений. Полеты вертолетов происходят в приземном воздушном слое атмосферы, и для обеспечения безопасности полета, эффективности решения полетных задач в автоматическом и инструментальном режимах пилотирования необходима информация о модуле, составляющих и углах направления вектора истинной воздушной скорости, барометрической высоте и приборной скорости, определяющих динамику движения вертолета относительно окружающей воздушной среды и получивших название *воздушных сигналов*.

Измерение воздушных сигналов вертолета затрудняется аэродинамическими искажениями, вносимыми индуктивными потоками несущего винта, особенно в области малых скоростей полета, когда фюзеляж и установленные на нем приемники аэрометрической информации находятся в створе вихревой колонны несущего винта. При этом пространственный характер потока, воспринимаемого аэрометрическими приемниками, а также способность вертолета совершать движения вперед — назад, вправо — влево и полет на режиме висения ограничивают использование традиционных для самолетов средств измерения воздушных сигналов [1, 2].

Известные системы воздушных сигналов вертолета типа ADS (фирма Paser System, США), XM-143 (фирма Marconi Avionics, Англия), СВС-В28 (ОАО "Ульяновское конструкторское бюро приборостроения", Россия) [2, 3], построенные на основе установленного в кардановом подвесе свободно ориентированного приемника воздушных давлений, имеют значительные погрешности определения указанных высотно-скоростных параметров вертолета в области малых и особенно вблизи околонулевых скоростей полета из-за малости флюгерного момента, трения в кардановом подвесе и нагружения подвижной системы. Наличие пневмоколлектора для съема воспринимаемых воздушных давлений с подвижного приемника усложняют конструкцию и снижают надежность работы таких систем. Диапазон измерения угла скольжения системы на основе свободно ориентируемого приемника давлений также ограничен значением $\pm 90^\circ$.

Известна система измерения воздушных параметров вертолета СИ ВПВ-52, разработанная ОАО "Аэроприбор — Восход" совместно с ЦАГИ, в которой два малогабаритных

многофункциональных приемника воздушных давлений ПВД-44 установлены на неподвижном аэродинамическом профиле, образуя неподвижный модуль измерения воздушных параметров (МИВП), устанавливаемый на подвеске на обоих бортах фюзеляжа [4]. Система СИ ВПВ-52 обеспечивает устойчивое измерение высотно-скоростных параметров вертолета при нахождении обоих МИВП вне зоны действия вихревой колонны несущей системы, но также в ограниченном диапазоне угла скольжения.

Проведение строительно-монтажных и поисково-спасательных работ, посадка на необорудованные и ограниченные площадки, применение высокоточного оружия, решение других задач полета вертолета определяют необходимость измерения высотно-скоростных параметров вертолета при панорамном изменении угла скольжения в диапазоне $\pm 180^\circ$, при малых и околонулевых скоростях полета и на режиме висения. Это обуславливает актуальность создания системы воздушных сигналов, построенной на новых принципах, максимально учитывающей специфику аэродинамики и динамики полета вертолета, удовлетворяющей требованиям по точности и надежности работы в реальных условиях эксплуатации. Одним из направлений расширения нижней границы рабочих скоростей полета и диапазона измерения угла скольжения является построение системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного пространственно-распределенного многофункционального аэрометрического приемника и использования для целей измерения информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта [5].

Особенности построения и алгоритмы обработки информации

Как показывает анализ аэродинамического поля вблизи фюзеляжа вертолета [5], вектор скорости V_Σ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, воспринимаемый приемником аэрометрической информации, можно представить в виде трех составляющих — стационарной составляющей V , обусловленной поступательным движением вертолета относительно воздушной среды, стационарной составляющей V_i скорости индуктивного потока и воздушного потока за счет тяги несущего винта, флуктуационной составляющей V_Φ ,

обусловленной маховыми движениями лопастей и работой автомата перекося:

$$\mathbf{V}_\Sigma = \mathbf{V} + \mathbf{V}_i + \mathbf{V}_\Phi.$$

Как показано ниже, вектор флуктуационной скорости \mathbf{V}_Φ результирующего воздушного потока вихревой колонны может быть выделен и в значительной степени отфильтрован от составляющих \mathbf{V} и \mathbf{V}_i в каналах системы воздушных сигналов вертолета. Тогда в качестве информативного параметра аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта можно использовать вектор скорости \mathbf{V}_Σ результирующего воздушного потока вихревой колонны в виде геометрической суммы вектора \mathbf{V} воздушного потока, формируемого при движении вертолета относительно окружающей среды, и вектора скорости \mathbf{V}_i воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета, т. е.

$$\mathbf{V}_\Sigma = \mathbf{V} + \mathbf{V}_i = \mathbf{V}_i - \mathbf{V}_B,$$

где $\mathbf{V}_B = -\mathbf{V}$ — вектор истинной воздушной скорости вертолета.

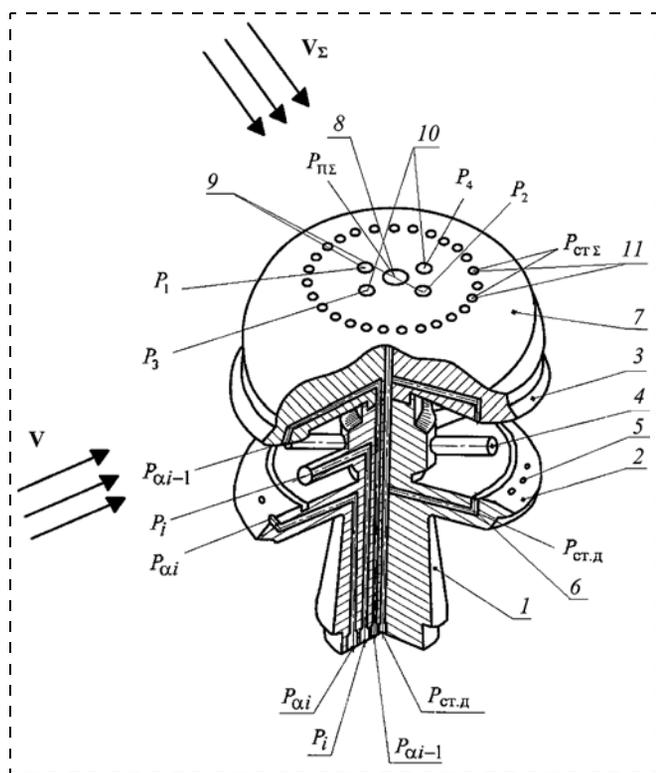


Рис. 1. Конструктивная схема неподвижного многофункционального аэрометрического приемника:

1 — неподвижный многоканальный проточный аэрометрический приемник; 2 и 3 — разнесенные по высоте экранирующие диски; 4 — трубки полного давления для забора давлений P_i , определяющих скорость и угол скольжения набегающего воздушного потока; 5 — отверстия для забора давлений $P_{\alpha i}$ и $P_{\alpha i-1}$, определяющих угол атаки набегающего воздушного потока; 6 — кольцевые каналы для забора дросселированного статического давления $P_{ст.д}$ набегающего воздушного потока; 7 — дополнительный сферический приемник; 8 — отверстие для забора полного давления $P_{пс}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта; 9 и 10 — отверстия, являющиеся приемниками давлений P_1 и P_2 , P_3 и P_4 , характеризующие углы φ_{01} и φ_{02} скоса результирующего воздушного потока вихревой колонны набегающего на приемник; 11 — отверстия, являющиеся приемниками статического давления $P_{ст.с}$ результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны

Для восприятия информативных параметров аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта предложено [5, 6] использовать неподвижный пространственно-распределенный многофункциональный аэрометрический приемник (рис. 1).

Для получения информации о высотнo-скоростных параметрах вертолета в области малых и околонулевых скоростей полета, когда неподвижный многоканальный проточный приемник 1 находится в створе вихревой колонны несущего винта вертолета, на наружной поверхности верхнего экранирующего диска 3 установлен аэрометрический приемник 7.

В целях уменьшения аэродинамических искажений приемник 7 выполнен в виде полусферы с диаметром, равным диаметру верхнего экранирующего диска, которая установлена непосредственно на его внешней поверхности. На верхней поверхности полусферического приемника 7 на оси симметрии расположено отверстие 8, являющееся приемником полного давления $P_{пс}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта. В плоскости, параллельной плоскости симметрии вертолета, под углом φ_{01} к оси симметрии на поверхности полусферического приемника симметрично расположены отверстия 9, являющиеся приемниками давлений P_1 и P_2 . В плоскости, перпендикулярной плоскости симметрии вертолета симметрично под углом φ_{02} к оси симметрии на верхней поверхности полусферического приемника расположены отверстия 10, являющиеся приемниками давлений P_3 и P_4 . Перпендикулярно оси симметрии полусферического приемника на его поверхности по окружности расположены отверстия 11, объединенные в общий канал приемника статического давления $P_{ст.с}$ результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны.

Модуль V_Σ скорости и плотность ρ_Σ результирующего набегающего воздушного потока можно определить по полному $P_{пс}$ и статическому $P_{ст.с}$ давлениям и температуре $T_{тс}$ заторможенного результирующего воздушного потока, воспринимаемой приемником температуры торможения, используя следующие зависимости [5, 6]:

$$V_\Sigma = \sqrt{\frac{T_{тс} \left[\left(\frac{P_{пс} - P_{ст.с}}{P_{ст.с}} + 1 \right)^{0,285714285} - 1 \right]}{3,840034 \cdot 10^{-5} \left(\frac{P_{пс} - P_{ст.с}}{P_{ст.с}} + 1 \right)^{0,285714285}}}; \quad (1)$$

$$\rho_\Sigma = \frac{P_{ст.с}}{287,05287 T_{тс}} \left(\frac{P_{пс} - P_{ст.с}}{P_{ст.с}} + 1 \right)^{0,2857143}$$

При нахождении неподвижного аэрометрического приемника в зоне вихревой колонны несущего винта в воспринимаемых приемником сигналах полного давления $P_{пс}$ и статического давления $P_{ст.с}$ присутствует шумовая составляющая, обусловленная вектором флуктуационной скорости \mathbf{V}_Φ , спектральная плотность которой сосредоточена в интервале частот, соответствующей угловой скорости вращения несущего винта. По данным летных испытаний системы воздушных сигналов вертолета СВС-В28 на основе свободно ориентированного приемника воздушных давлений, установленного в зоне вихревой колонны несущего винта вертолета Ми-28, спектральная плотность шума определяется интервалом частот $f_{ш} = 0,8...1$ Гц, вследствие чего модуль V_Σ вектора скорости регулирующего воздушного потока вихревой

колонны несущего винта имеет существенное рассеяние, среднее квадратическое значение которого можно оценить величиной $\sigma_{\Delta V_{\Sigma}} \approx 7,5$ км/ч [7].

Для уменьшения влияния пульсаций вектора скорости V_{Σ} результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, а следовательно, для снижения шумов в сигнале полного давления $P_{\Pi\Sigma}$, статического давления $P_{\text{ст}\Sigma}$ и давлений P_1, P_2 и P_3, P_4 , определяющих угловое положение вихревой колонны несущего винта, при обработке выходных сигналов указанных датчиков целесообразно использовать цифровые фильтры. Как показано в работе [7], в системе СВС-В28 использовался цифровой фильтр, описываемый уравнением

$$y_n = \frac{\Delta^2(x_n + 2x_{n-1} + x_{n-2}) + 2(4T - \Delta)y_{n-1} - (4T^2 - 4\xi T\Delta + \Delta^2)y_{n-2}}{4T^2 + 4T\xi\Delta + \Delta^2},$$

где Δ — интервал дискретизации (шаг счета вычислителя); x_n, x_{n-1}, x_{n-2} и y_n, y_{n-1}, y_{n-2} — значения входного и выходного сигналов фильтра, соответствующих моментам времени $t_n = n\Delta, t_{n-1} = n\Delta - \Delta; t_{n-2} = n\Delta - 2\Delta$; начальные условия: $x_{n-1} = x_{n-2} = 0; y_{n-1} = y_{n-2} = 0, y_0 = x_0, T = 0,5$ с, $\xi = 0,7$. При этом рассеяния модуля V_{Σ} вектора скорости результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта существенно уменьшается и определяется среднее квадратическим значением $\sigma_{\Delta V_{\Sigma}} \approx 3,1$ км/ч [7].

Используя соотношение (1), проекции вектора V_{Σ} результирующего воздушного потока на оси связанной с вертолетом системы координат можно определить следующим образом:

$$V_{\Sigma x} = V_{\Sigma} \sin \varphi_1 \cos \varphi_2; V_{\Sigma y} = V_{\Sigma} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2; V_{\Sigma z} = V_{\Sigma} \sin \varphi_2,$$

где φ_1 и φ_2 — углы, определяющие положение вектора V_{Σ} результирующего набегающего потока вихревой колонны относительно осей симметрии приемников давлений P_1, P_2 и P_3, P_4 .

По давлениям P_1, P_2 и P_3, P_4 , воспринимаемым отверстиями 9 и 10, расположенными на верхней поверхности полусферического приемника 7 (рис. 1), можно определить углы φ_1 и φ_2 , определяющие положение вектора V_{Σ} результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны несущего винта вертолета. Используя соотношения, приведенные в работе [8], связь давлений P_1, P_2 и P_3, P_4 с углами φ_1 и φ_2 , можно представить в виде

$$\frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} = \frac{9}{4} \sin 2\varphi_{01} \sin 2\varphi_1;$$

$$\frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} = \frac{9}{4} \sin 2\varphi_{02} \sin 2\varphi_2.$$

Поскольку неподвижный аэрометрический приемник расположен на фюзеляже в точке, имеющей некоторый радиус-вектор $R(x, y, z)$ относительно центра масс вертолета, то при вращении вертолета вокруг центра масс имеет место кинематическое искажение вектора V скорости воздушного потока, обусловленное движением вертолета относительно окружающей среды, которое определяется уравнением

$$V_{\text{кx}} = V_x + (\omega_y z - \omega_x y); V_{\text{ky}} = V_y + (\omega_z x - \omega_x z);$$

$$V_{\text{kz}} = V_z + (\omega_x y - \omega_y x),$$

где $V_{\text{кx}}, V_{\text{ky}}, V_{\text{kz}}$ — проекции кинематически искаженного вектора $V_{\text{к}}$ скорости набегающего воздушного потока в месте установки аэрометрического приемника; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — угловые скорости вращения вертолета относительно осей связанной системы координат; x, y, z — координаты места установки аэрометрического приемника в связанной системе координат, центр которой находится в центре масс вертолета.

Тогда составляющие V_x, V_y, V_z , модуль $V_{\text{в}}$ вектора $V_{\text{в}}$ истинной воздушной скорости, углы атаки α и скольжения β вертолета, барометрическая высота H , статическое давление P_H и плотность ρ_H на высоте H , а также приборная скорость $V_{\text{пр}}$ определяются в соответствии с соотношениями вида

$$V_x = V_{\Sigma} \sin \left[\frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 K_1(\varphi_2, V_{\Sigma}) \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right) \right] \times$$

$$\times \cos \left[\frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 K_2(\varphi_1, V_{\Sigma}) \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right) \right] -$$

$$- K_{ix} |V_{i0}| - (\omega_y z - \omega_x y);$$

$$V_y = V_{\Sigma} \cos \left[\frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 K_1(\varphi_2, V_{\Sigma}) \sin 2\varphi_{01}} \frac{P_1 - P_2}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right) \right] \times$$

$$\times \cos \left[\frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 K_2(\varphi_1, V_{\Sigma}) \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right) \right] -$$

$$- K_{iy} |V_{i0}| - (\omega_z x - \omega_x z);$$

$$V_z = V_{\Sigma} \sin \left[\frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4}{9 K_2(\varphi_1, V_{\Sigma}) \sin 2\varphi_{02}} \frac{P_3 - P_4}{P_{\Pi\Sigma} - P_{\text{ст}\Sigma}} \right) \right] -$$

$$- K_{iz} |V_{i0}| - (\omega_x y - \omega_y x);$$

$$V_{\text{в}} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2};$$

$$\alpha = \arctg \frac{V_y}{V_x}; \beta = \arcsin \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}} = \arcsin \frac{V_z}{V_{\text{в}}};$$

$$P_H = P_{\text{ст}\Sigma} - K_p \frac{\rho_{\Sigma} V_{\Sigma}^2}{2};$$

$$H_{\text{абс}} = H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right]; \rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_H}{P_0 T_H}; \quad (2)$$

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{2gRT_0 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_{\text{дин}}}{P_0} \right)^{\frac{k}{k-1}} \right]}; P_{\text{дин}} = 0,5 \rho_H V_{\text{в}}^{0,2},$$

где P_0 и T_0 — абсолютное давление и температура воздуха на уровне моря; R и k — удельная газовая постоянная и показатель адиабаты для воздуха; $|V_{i0}|$ — модуль вектора индуктивной скорости несущего винта вертолета на режиме висения; τ — температурный градиент; $K_p, K_{ix}, K_{iy}, K_{iz}$ — безразмерные коэффициенты, зависящие от параметров полета и определяемые по результатам летных испытаний системы на вертолете; $K_1(\varphi_2, V_{\Sigma})$ и $K_2(\varphi_1, V_{\Sigma})$ — коэффициенты, учитывающие взаимное влияние углов φ_1 и φ_2 на распределение давлений P_1, P_2 и P_3, P_4 на поверхности полусферы, которые в общем случае зависят от величины V_{Σ} и определяются при тарировке АМП в аэродинамической трубе.

Соотношения (2) позволяют определить высотные параметры полета вертолета на малых и околонулевых скоростях и на режиме висения при нахождении неподвижного АМП в зоне вихревой колонны несущего винта.

При выходе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника из зоны вихревой колонны несущего винта высотные параметры вертолета определяются по давлениям P_i , $P_{\alpha i}$, $P_{\alpha i-1}$, $P_{ст.д.}$, воспринимаемым многоканальным проточным аэрометрическим приемником I (рис. 1), в соответствии с алгоритмами, приведенными в работах [3, 9].

На первом этапе обработки массива давлений P_i определяется номер i -й трубки полного давления, в пределах которой локализовано направление вектора скорости \mathbf{V} набегающего воздушного потока, равного по величине и обратного по направлению вектору \mathbf{V}_B , т. е. $\mathbf{V} = -\mathbf{V}_B$. За такую i -ю трубку полного давления принимается трубка, в которой значение измеренного давления P_i является наибольшим из всех трубок полного давления ($i = 0, 1, 2, \dots, n$). При этом принимается, что ось трубки полного давления под номером $i = 0$ совпадает с началом исходной системы координат отсчета угла направления ψ вектора \mathbf{V}_B истинной воздушной скорости вертолета.

По определенному номеру такой i -й трубки полного давления, в которой давление P_i наибольшее, определяется первое приближение ψ_{mi} угловой координаты направления вектора скорости \mathbf{V}_B в соответствии с выражением $\psi_{mi} = \frac{360}{n} i$, где n — число расположенных под одинаковым углом трубок полного давления (как правило $n = 6$ или $n = 8$).

Для определения точного значения угловой координаты ψ вектора скорости \mathbf{V}_B осуществляется преобразование реальной угловой характеристики трубок полного давления в другую систему координат путем введения безразмерной угловой координаты θ , начало которой совпадает с точкой пересечения смежных ветвей угловых характеристик ($i - 1$)-й и ($i + 1$)-й трубок полного давления.

Угловое положение θ i -й трубки полного давления относительно направления ψ вектора скорости \mathbf{V}_B в новой системе координат определяется из решения одного из уравнений $\frac{P_{i+1}}{P_i} = \frac{f(\theta)}{f(-\theta)}$; $\frac{P_{i-1}}{P_i} = \frac{f(-\theta)}{f(\theta)}$, где $f(\theta)$ и $f(-\theta)$ аппроксимируются полиномами степени k , вычисленными по результатам предварительной градуировки неподвижного многоканального проточного аэрометрического приемника и описывающими соответственно правую и левую части угловой характеристики смежных ($i - 1$)-й и ($i + 1$)-й трубок полного давления во введенной системе координат.

Тогда второе приближение угловой координаты ψ вектора скорости \mathbf{V}_B в исходной системе координат определяется выражением

$$\psi = \beta = \psi_{mi} \pm (\theta_{\max} - \theta_x)t_0,$$

где t_0 — координатный шаг сплайн-функции, реализующей аппроксимирующий полином $P_i = f(\theta)$ в безразмерной системе координат, например при $n = 6$ $t_0 = 60^\circ$; β — угол скольжения вертолета.

Для определения модуля V_B вектора истинной воздушной скорости вертолета по полученному значению θ_x безразмерного углового положения i -й трубки полного давления вычисляется значение давления $P_{i\max}$, соответствующее совпадению направления вектора скорости набегающего воздушного потока с осью i -й трубки полного давления:

$$P_{i\max} = \begin{cases} \frac{P_i f(\theta_{\max})}{f(-\theta_x)} & \text{при } P_{i-1} > P_{i+1}; \\ \frac{P_i f(-\theta_{\max})}{f(-\theta_x)} & \text{при } P_{i-1} < P_{i+1}. \end{cases}$$

По полученному значению $P_{i\max}$ определяется численное значение модуля V_B вектора истинной воздушной скорости вертолета с использованием выражения вида

$$V_B = \sqrt{\frac{2}{\rho_H} (P_{i\max} - P_H)} = \sqrt{\frac{2 P_0 T_0}{\rho_0 P_H T_H} (P_{i\max} - P_H)},$$

где $\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_H}{P_0 T_0}$ — плотность воздуха на высоте полета H ;

P_H и T_H — статическое давление и абсолютная температура на высоте H ; $P_0 = 760$ мм. рт. ст. = 101325 Па, $\rho_0 = 1,225$ кг/м³ и $T_0 = 288,15$ К — статическое давление, плотность воздуха и абсолютная температура на высоте $H = 0$ стандартной атмосферы.

Статическое давление P_H и абсолютная температура T_H на высоте H вертолета определяются по статическому давлению $P_{ст.д.}$, воспринимаемому неподвижным проточным аэрометрическим приемником (рис. 1), и по показаниям бортового приемника температуры торможения $T_{т.с.}$, установленного на фюзеляже вертолета.

По давлениям $P_{\alpha i}$ и $P_{\alpha i-1}$, воспринимаемым отверстиями на нижнем и верхнем экранирующих дисках неподвижного многоканального проточного аэрометрического приемника, определяется положение α вектора скорости \mathbf{V} набегающего воздушного потока в ортогональной плоскости, например по соотношению вида $\alpha = \arcsin\left(\frac{1}{2 \sin 2\varphi_0} \frac{P_{\alpha i} - P_{\alpha i-1}}{P_{i\max} - P_{ст.д.}}\right)$, где φ_0 — угол расположения приемных отверстий по каналу угла атаки.

По дросселированному статическому давлению $P_{ст.д.} = K_p P_H$, воспринимаемому канавками, установленными в характерном сечении проточного аэрометрического приемника, определяется барометрическая высота в соответствии со стандартной зависимостью $H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_{ст.д.}}{K_p P_0}\right)^{\tau R}\right]$, где K_p — коэффициент, определяемый при тарировке аэрометрического приемника в аэродинамической трубе; $\tau = 0,0065$ К/м — температурный градиент; $R = 29,27$ м/К — газовая постоянная воздуха.

Таким образом, с помощью неподвижного многоканального проточного аэрометрического приемника обеспечивается измерение высотных параметров вертолета при таких скоростях полета, когда приемник находится вне зоны вихревой колонны несущего винта в диапазоне изменения углов скольжения $\pm 180^\circ$.

Экспериментальный образец системы и результаты испытаний в аэродинамической трубе

В соответствии с рассмотренными подходами по техническому заданию ОАО "Ульяновское конструкторское бюро приборостроения" разработан и изготовлен экспериментальный промышленный образец системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника с обработкой информативных сигналов в промышленном ноутбуке.

На рис. 2 представлен общий вид и комплектация экспериментального промышленного образца системы.

Проведены испытания экспериментального промышленного образца системы в аэродинамической трубе ТЗ-К Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева, зарегистрированной в Государственном реестре средств измерения (№ 22835-02).

На режиме, соответствующем нахождению датчика ДВС-ВНК в зоне вихревой колонны несущего винта, информация о составляющих вектора истинной воздушной скорости воспринимается неподвижным полусферическим приемником (рис. 3, а). Как показали испытания в аэродинамической трубе, на режиме малых и околонулевых скоростей полета вертолета, когда неподвижный аэрометрический приемник находится в зоне вихревой колонны несущего винта, экспериментальный промышленный образец обеспечивает измерение продольной V_x и боковой V_z составляющих вектора истинной воздушной скорости с инструментальной погрешностью, не превышающей значений $\Delta V_x = \Delta V_z = \pm 3,6...4$ км/ч, вертикальной составляющей V_y — с погрешностью не более

$$\Delta V_y = \pm 3,35...4,4 \text{ км/ч.}$$

На режимах, соответствующих выходу датчика ДВС-ВНК из зоны вихревой колонны несущего винта, информация о высотнo-скоростных параметрах вертолета воспринимается неподвижным многоканальным про-

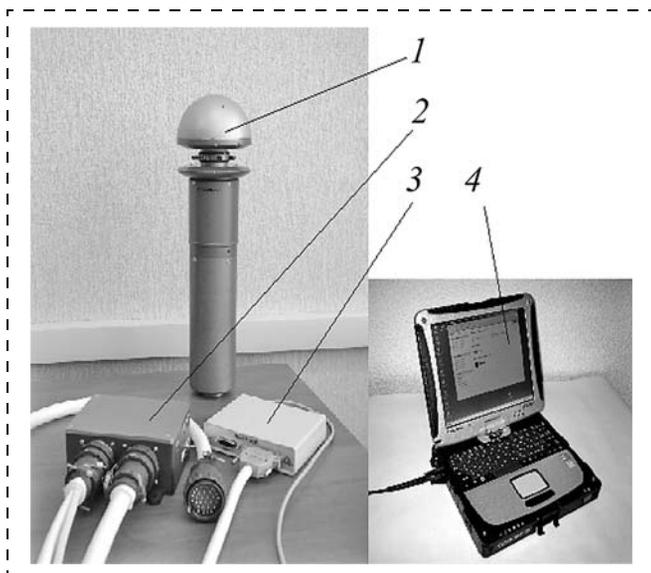
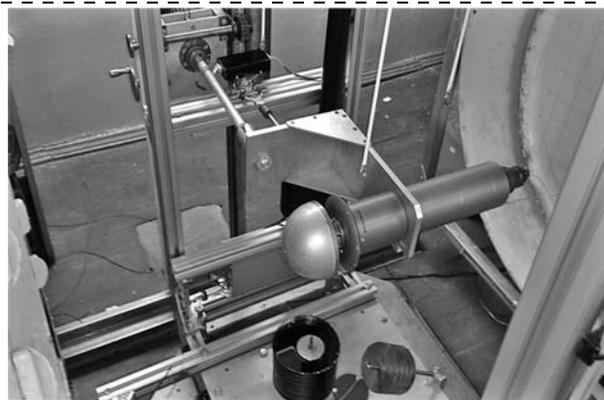
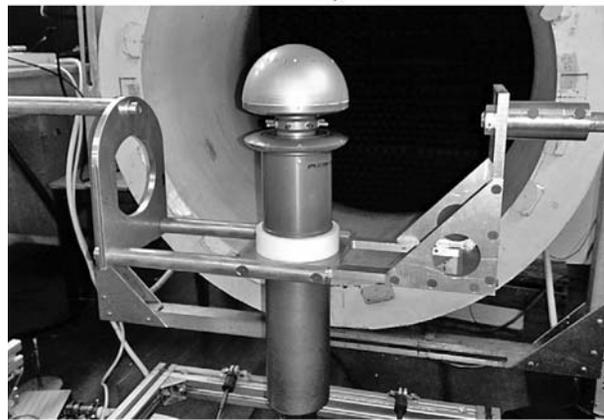


Рис. 2. Фотография экспериментального промышленного образца системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника с обработкой информативных сигналов в промышленном ноутбуке



а)



б)

Рис. 3. Положение экспериментального образца датчика воздушных сигналов ДВС-ВНК в рабочем поле аэродинамической трубы в режиме малых скоростей (а) и при выходе его из зоны вихревой колонны несущего винта (б)

точным аэрометрическим приемником (рис. 3, б). Как показали испытания в аэродинамической трубе экспериментального промышленного образца системы, инструментальная погрешность измерения угла скольжения в диапазоне $\pm 180^\circ$ не превышает значения $\Delta\beta = \pm 0,5...0,7^\circ$, инструментальная погрешность измерения истинной воздушной скорости при изменении угла скольжения в диапазоне $\pm 180^\circ$ — не более $\Delta V_B = \pm 2...3$ км/ч, колебания дросселированного статического давления $P_{ст.д}$, воспринимаемые в проточном канале неподвижного многоканального проточного аэрометрического приемника, не превышают значения $\Delta P_{ст.д} = \pm 60...75$ Па, что соответствует погрешности определения барометрической высоты на уровне Земли не более $\Delta H = \pm 4...5$ м.

Заключение

Таким образом, предложенные подходы, модели и алгоритмы обработки информации системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника и информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта позволяют определить высотнo-скоростные параметры вертолета в широком диапазоне эксплуатации, в том числе в области малых и околонулевых скоростей полета и на режиме висения с достаточно высокой инструментальной точностью.

Применение рассмотренной системы воздушных сигналов на различных классах вертолетов позволит повысить безопасность полета, эффективность пилотирования и боевого применения, обеспечить надежность работы системы в условиях возможных резких возмущений аэродинамического поля вертолета, например при пуске ракеты.

Список литературы

1. Алексеев Н. В., Кравцов В. Г., Назаров О. И. и др. Системы измерения воздушных параметров нового поколения // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 8. С. 31–36.
2. Козицин В. К., Макаров Н. Н., Порунов А. А., Солдаткин В. М. Анализ принципов построения систем измерения воздушных сигналов вертолета // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 10. С. 2–13.
3. Солдаткин В. М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448 с.

4. Система измерения воздушных параметров СИ ВПВ-52. ОАО "Аэроприбор — Восход". URL: <http://www.aeropribor.ru>
5. Солдаткин В. В. Система воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного комбинированного аэрометрического приемника и информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. 284 с.
6. Солдаткин В. В., Солдаткин В. М., Порунов А. А., Никитин А. В., Макаров Н. Н., Кожевников В. И., Белов В. П., Истомин Д. А. Система воздушных сигналов вертолета. RU 2427844 С1. Заявл. 09.03.2010. Опубл. 27.08.2011.
7. Семенов А. В. Повышение точности и помехозащищенности элементов бортовых систем обеспечения безопасности полета летательных аппаратов. Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Ульяновск: Ульяновск. гос. техн. ун-т. 2008. 18 с.
8. Петунин А. А. Методы и техника измерения параметров газового потока. М.: Машиностроение, 1972. 332 с.
9. Порунов А. А., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М. Всенаправленная система воздушных сигналов вертолета с неподвижным многоканальным аэрометрическим приемником // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 3. С. 8–14.

V. V. Soldatkin, Associate professor, haibulova.piis@kstu-kai.ru,
Kazan national research technical university named after A. N. Tupolev — KAI

Features Construction and Characteristics of the System of Air Signals Helicopter's on the Basis of Stationary Multifunctional Aerometric Receiver

The analysis of problem of high-speed parameters helicopter's taking into account aerodynamic disturbances of vortex column of the main rotor. The prospects of creation of the system of air data signals helicopter's on the basis of stationary multifunctional aerometric receiver and information aerodynamic field of vortex column of the main rotor are proved.

The theoretical basis for the definition of high-speed parameters helicopter's in the range small speeds of flight of the basis of information aerodynamic field of vortex column main rotor's, mathematical models and algorithms of processing in channel of air data system on the basis of stationary multifunctional aerometric receiver and information aerodynamic field of vortex column of the main rotor's are considered.

The methodology of construction and designing of stationary multifunctional aerometric receiver, the models of informative signals, methods of parametric synthesis and rational choice of design parameters, the results of experimental research of characteristics of the receiver are considered.

Preparation for pipe testing, pipe testing are made, static characteristics are made and evaluation of instrumental errors of measuring channels of experimental sample of air data system helicopter's on the basis stationary multifunctional aerometric receiver and information aerodynamic field of the vortex column of main rotor. The results of development and research in the wind funnel of experimental sample of air data system helicopter's on the basis stationary multifunctional aerometric receiver and information aerodynamic field of vortex column of the main rotor are considered.

Keywords: helicopter, air data signals, measurement, system, stationary multifunctional receiver, features construction, experimental sample, pipe test, characteristic

References

1. Alekseev N. V., Kravtsov V. G., Nazarov O. I. i dr. Sistemy izmereniya vozdushnykh parametrov novogo pokoleniya. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2003. N. 8. P. 31–36.
2. Kozitsin V. K., Makarov N. N., Porunov A. A., Soldatkin V. M. Analiz printsi pov postroeniya sistem izmereniya vozdushnykh signalov vertoleta. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2003. N. 10. P. 2–13.
3. Soldatkin V. M. Metody i sredstva izmereniya aerodinamicheskikh uglov letatel'nykh apparatov. Kазан': Izd-vo Kазан. gos. tekhn. un-ta, 2001. 448 p.
4. Sistema izmereniya vozdushnykh parametrov SI VPV-52. ОАО "Аэроприбор — Восход". URL: <http://www.aeropribor.ru>
5. Soldatkin V. V. Sistema vozdushnykh signalov vertoleta na osnove nepodvizhnogo kombinirovannogo aerometricheskogo priemnika i informatsii aerodinamicheskogo polya vikhreвой kolonny nesush-

chego vinta: Monografiya. Kазан': Izd-vo Kазан. gos. tekhn. un-ta, 2012. 284 p.

6. Soldatkin V. V., Soldatkin V. M., Porunov A. A., Nikitin A. V., Makarov N. N., Kozhevnikov V. I., Belov V. P., Istomin D. A. Sistema vozdushnykh signalov vertoleta. RU 2427844 S1. Zayavl. 09.03.2010. Opubl. 27.08.2011.

7. Semenov A. V. Povyshenie tochnosti i pomekhozashchishchenosti elemen-tov bortovykh sistem obespecheniya bezopasnosti poleta letatel'nykh ap-paratov. Avtoreferat diss. na soisk. uch. st. kand. tekhn. nauk. Ul'yanovsk: Ul'yanovsk. gos. tekhn. un-t. 2008. 18 p.

8. Petunin A. A. Metody i tekhnika izmereniya parametrov gazovogo potoka. M.: Mashinostroenie, 1972. 332 p.

9. Porunov A. A., Soldatkin V. V., Soldatkin V. M. Vsenapravlen'naya sistema vozdushnykh signalov vertoleta s nepodvizhnym mnogokanal'nym aerometricheskim priemnikom. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2007. N. 3. P. 8–14.

С. В. Колесниченко, канд. техн. наук, доц., serjkor@yandex.ru,
 Михайловская военная артиллерийская академия

Разработка методологии обоснования требований к точности чувствительных элементов комплексированных систем управления летательных аппаратов

Рассмотрены актуальные вопросы исследований по обоснованию необходимой точности чувствительных элементов бесплатформенных навигационных систем в условиях комплексирования с альтернативными навигационными системами. Рассмотрены рациональные варианты комплексирования бортовой аппаратуры систем управления.

Ключевые слова: точность, автономная навигация, комплексирование, чувствительный элемент, БИНС, эффективность

Введение

Улучшение характеристик систем автономной навигации летательных аппаратов долгие годы осуществлялось в направлении наращивания возможностей и совершенствования схемных решений инерциальных навигационных систем (ИНС). К сожалению, экономические трудности, жесткие требования к эксплуатационным характеристикам, ограниченные сроки разработки и внедрения на определенном этапе (в 1990-х гг.) привели к значительному сворачиванию работ в области традиционных технологий. В первую очередь, это относится к исследованиям в области создания прецизионных гироскопических и оптико-механических систем с улучшенными характеристиками. Разработка и производство последних требует больших временных, экономических и интеллектуальных затрат. Исходя из указанных обстоятельств все большее внимание уделяется проработке новых способов повышения эффективности систем управления высокодинамичных летательных аппаратов (ВДЛА). Так, в настоящее время все большее распространение приобретают бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), которые обладают рядом преимуществ по сравнению с классическими ИНС, имеющими в своем составе гиросtabilизированные платформы (ГСП). К этим преимуществам можно отнести: отсутствие классического прицеливания в ходе процессов предстартовой подготовки, сокращение времени предстартовых операций, меньшую массу, компактность, относительно низкую стоимость производства.

В то же время, применение БИНС как самостоятельной системы не является всегда возможным с точки зрения накопления погрешностей во времени вертикальным каналом БИНС, в котором особенно критичны требования к точности измерения высоты объекта. Как следствие, в равной степени актуальны вопросы построения "чисто" автономных и комплексированных ИНС на основе БИНС.

При проектировании БИНС, как и любой другой ИНС, большую важность имеет вопрос точности определения навигационных параметров (НП). Применительно к БИНС точность функционирования системы и комплекса в целом зависит не только от погрешностей измерителей, но и от динамики объекта.

Разработка методологии обоснования требований к точности чувствительных элементов бесплатформенных инерциальных навигационных систем высокодинамичных летательных аппаратов

При разработке положений методологии в качестве исходных данных были использованы:

- данные анализа существующих технических систем и конкретно ВДЛА, в которых применяются (или

предполагается использование в перспективе) БИНС;

- данные фоноцелевой обстановки, сопутствующие применению ВДЛА;
- основные задачи БИНС, обеспечивающих доставку ВДЛА в точку интереса.

В общем случае разработанная методика представляет собой совокупность следующих этапов:

- оценка условий применения ВДЛА;
- определение предельно допустимого отклонения полезной нагрузки от точки интереса, обусловленного ошибкой работы БИНС;
- формирование требований к допустимым значениям погрешностей чувствительных элементов БИНС.

При исследовании условий применения ВДЛА исходными данными являются:

- перечень задач по доставке ВДЛА в точку (зону) интереса;
- динамика и интенсивность движения объектов в точках (зонах) интереса;
- данные анализа и обобщения возможного состава объектов в точках (зонах) интереса.

Этап оценки условий применения ВДЛА в общем виде можно представить следующей последовательностью действий:

- анализ целевой обстановки;
- анализ траектории и динамики движения ВДЛА;
- анализ функционального состава системы управления.

Под *целевой обстановкой* (ЦО) понимается совокупность объектов, задаваемых их пространственно-временным расположением, характеристиками каждого объекта и требуемым уровнем воздействия. В целях проводимого исследования рассмотрено ограниченное число объектов, которые в определенном смысле являются типовыми и отражают основную сущность объектов различных классов, причем ЦО представляет собой всевозможные совокупности объектов в соответствии с диапазоном решаемых задач.

Результатами анализа ЦО должны стать:

- вывод о пространственном размещении типовых объектов;
- виды и характеристики воздействия полезной нагрузки;
- степень подвижности объектов в зоне интереса;
- требуемый уровень воздействия;
- анализ среды и систем возможного противодействия;
- вывод о необходимости и возможности осуществления пространственного маневра;

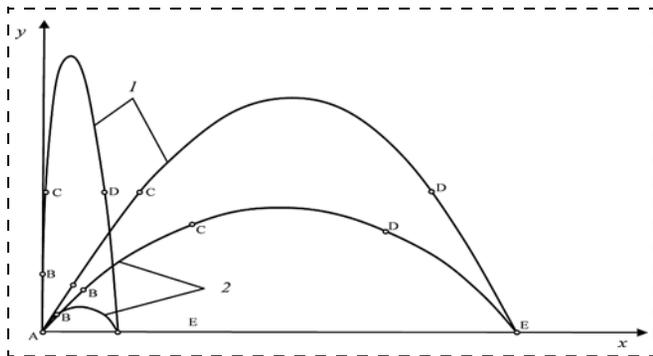


Рис. 1. Виды некоторых траекторий полета ВДЛА: 1 — навесные траектории; 2 — настильные траектории

- максимальное время проведения подготовительных операций.

В ходе анализа траектории и динамики движения ВДЛА (рис. 1) выявляются следующие особенности движения ВДЛА:

- время полета (исходя из максимальной дальности);

- время прохождения типовых участков (в процентном соотношении к общему времени полета) и порядок действующих на них возмущений (линейных ускорений и угловых скоростей).

Анализ, проведенный в работах [1—5], позволяет сделать вывод о том, что наряду с инерциальными системами управления в настоящее время активно развиваются комплексированные системы (КСУ). Независимо от варианта построения комплексированных систем они, как правило, имеют в своем составе ИНС, а вариант функционального состава в конечном итоге определяет требования к точности работы ИНС.

В качестве наиболее приемлемых вариантов построения КСУ рассматриваются следующие:

- КСУ, имеющие в своем составе БИНС и аппаратуру потребителя сетевых спутниковых радионавигационных систем (АП СРНС);
- КСУ, имеющие в своем составе БИНС и головку самонаведения (ГСН).

Очевидно, что в перечисленных случаях требуемая точность работы БИНС будет различной. В первом случае ошибки выработки навигационных параметров БИНС

Таблица 1

Сравнительные характеристики комплексированных систем различной архитектуры

Тип схемы	Преимущества	Недостатки
<p>Разомкнутая</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Избыточность. 2. Ограниченность ошибок выработки координат и скорости, наличие информации об ориентации и угловой скорости. 3. Минимальные изменения в бортовой аппаратуре 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Низкая помехоустойчивость. 2. Невозможность выставки и калибровки ИНС в полете
<p>Слабосвязанная</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Избыточность. 2. Ограниченность ошибок выработки координат и скорости, наличие информации об ориентации и угловой скорости. 3. Минимальные изменения в бортовой аппаратуре. 4. Выставка и калибровка ИНС в полете 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Низкая помехоустойчивость. 2. Необходимость синхронизации измерений ИНС и НАП СРНС. 3. Взаимная корреляция ошибок на выходе фильтра НАП СРНС
<p>Сильносвязанная</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограниченность ошибок выработки координат и скорости, наличие информации об ориентации и угловой скорости. 2. Выставка и калибровка ИНС в полете. 3. Высокая помехоустойчивость 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Необходимость разработки специальной НАП СРНС. 2. Ухудшение надежности (отказ БИНС приводит к отказу системы в целом). 3. Повышенная требовательность к производительности БЦВМ
<p>Глубокоинтегрированная</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограниченность ошибок выработки координат и скорости, наличие информации об ориентации и угловой скорости. 2. Выставка и калибровка ИНС в полете. 3. Высокая помехоустойчивость 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Необходимость разработки специальных датчиков. 2. Ухудшение надежности (отказ БИНС приводит к отказу системы в целом). 3. Большой размер вектора состояния — высокая требовательность к производительности БЦВМ

будут компенсироваться за счет избыточной навигационной информации, вырабатываемой АП СРНС, что приведет к снижению требований к точности БИНС. В случае второго варианта построения системы управления ее задача будет заключаться в том, чтобы на этапе подлета к цели обеспечить правильное функционирование ГСН. При этом точность функционирования БИНС будет определяться именно требованиями к точности вывода ВДЛА в точку (зону) интереса.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики комплексированных систем управления различной архитектуры, имеющих в своем составе БИНС и АП СРНС.

В результате оценки функционального состава системы управления должна быть определена возможная степень снижения требований к точности БИНС.

Определение предельно допустимого отклонения ВДЛА, обусловленного ошибкой работы приборов системы управления. Применительно к полезной нагрузке сосредоточенного действия для оценки значения допустимой срединной суммарной ошибки пуска использовали зависимость для вероятности воздействия на объект (вероятностью поражения) $P_{пор}$ [3, 8]:

$$P_{пор} = 1 - e^{-\rho^2 \frac{S_{пр}}{\pi E_p^2}}, \quad (1)$$

где $S_{пр}$ — приведенная площадь воздействия на интересующий объект; E_p — срединная суммарная ошибка полета (в метрах); ρ — значение аргумента, при котором функция Лапласа равна 0,5.

Применительно к полезной нагрузке площадного действия для оценки допустимой срединной суммарной ошибки пуска использовали зависимость для математического ожидания значения причиненного ущерба объекту $M_{ущ}$:

$$M_{ущ} = 1 - e^{-\rho^2 \frac{R_{зр}^2}{E_p^2 + \frac{0,114}{\pi} S_{ц}}}, \quad (2)$$

где $R_{зр}$ — радиус зоны рассеивания боевых элементов; $S_{ц}$ — площадь интересующего объекта; E_p — срединная суммарная ошибка полета (в метрах); ρ — значение аргумента, при котором функция Лапласа равна 0,5.

Используя зависимости (1), (2), а также учитывая требуемые значения ($P_{пор} = 0,8...0,9$ и $M_{ущ} = 0,4...0,7$), можно определить предельные значения срединного суммарного отклонения координат доставки полезной нагрузки.

Для последующего анализа составляющих срединного суммарного отклонения полезной нагрузки использована зависимость следующего вида:

$$E_p = \sqrt{E_{цу}^2 + E_{ТП}^2 + E_{СУ}^2 + E_{СПр}^2}, \quad (3)$$

где $T_{цу}$ — ошибка целеуказания; $E_{ТП}$ — характеристика ошибки топогеодезической привязки; $E_{СУ}$ — рассеивание ВДЛА за счет погрешности работы ее СУ; $E_{СПр}$ — предельное отклонение ВДЛА за счет суммарной погрешности СПр (ошибки выставки БИНС).

Тогда

$$E_{СУ} = \sqrt{E_p^2 - E_{цу}^2 - E_{ТП}^2 - E_{СПр}^2}. \quad (4)$$

Формирование требований к допустимым значениям погрешностей чувствительных элементов БИНС. Для об-

легчения анализа влияния ошибок чувствительных элементов (ЧЭ) на точность функционирования БИНС на коротком интервале времени выработки навигационных параметров (НП) (характерном, например, для скоротечного полета) ошибки выработки НП в приближенном виде (для одной составляющей) можно представить как [6, 7]:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S}_y &= \Delta V_y; \\ \Delta \dot{V}_y &= g\alpha_x + \Delta\alpha_y; \\ \dot{\alpha}_x &= \Delta\omega_x, \end{aligned} \quad (5)$$

где ΔS , ΔV_y , α_x — ошибки определения координаты, скорости и вертикали соответственно; $\Delta\omega_x$, $\Delta\alpha_y$ — ошибки ДУС и акселерометра; g — ускорение свободного падения.

Используя уравнения (5), нетрудно получить приближенные соотношения для нахождения вклада ошибок гироскопических датчиков (их уходов) и акселерометров в ошибки НП. Для случая, когда предполагается неизменность во времени ошибок ЧЭ, эти соотношения будут иметь следующий вид [8]:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= \frac{\Delta\omega g t^3}{6}; \\ \Delta x_2 &= \frac{\Delta a t^2}{2}; \\ \Delta x_3 &= D\Delta\psi, \end{aligned} \quad (6)$$

где Δx_1 , Δx_2 , Δx_3 — соответственно вклад в ошибки определения координат погрешностей гироскопов, акселерометров и начальной выставки (прицеливания); $\Delta\omega$, Δa , $\Delta\psi$ — погрешности гироскопов, акселерометров и начальной выставки.

Погрешность гироскопа можно представить в следующем виде:

$$\Delta\omega = S_x\omega_x + M_y\omega_y + M_z\omega_z + B_{fx} + sm_x, \quad (7)$$

где ω_x — угловая скорость вокруг оси, вдоль которой установлен гироскоп; B_{fx} — постоянное смещение, не зависящее от ускорения; sm_x — случайное смещение; M_x , M_z — коэффициенты неортогональности; S_x — ошибка масштабного коэффициента; ω_y , ω_z — угловая скорость вокруг осей, ортогональных измеряемой.

Погрешность акселерометров можно представить следующим образом:

$$\Delta a = S_x a_x + M_y a_y + M_z a_z + B_f + B_v a_x a_z + sm_x, \quad (8)$$

где a_x — ускорение вдоль оси чувствительности акселерометра; a_y , a_z — ускорение вдоль осей, ортогональных измеряемой; B_v — анизотропное смещение.

Анализ литературы [6—9] позволяет сделать вывод о том, что наибольшую трудность представляет компенсация ошибок масштабных коэффициентов гироскопов и акселерометров, а также случайные составляющие дрейфов гироскопов и случайные смещения нулевого сигнала акселерометров.

Расчет характеристик точности ЧЭ БИНС проводится в следующем порядке:

1. Определяется вклад в значение отклонения ракеты, обусловленного ошибками работы приборов СУ $E_{СУ}$, величин Δx_1 , Δx_2 .

Значения возмущающих воздействий на характерных участках траектории

Наименование	t_0, c	t_1, c	T, c	$\omega, ^\circ/c$	a, g
Активный	0	40	40	50	10
Свободный	40	280	240	10	3
Маневр ПРО	280	290	10	300	20
Сближение	290	320	40	70	15

Примечание: t_0 — время начала участка траектории; t_1 — время окончания участка траектории; T — длительность участка траектории; ω — угловая скорость; a — ускорение.

2. Рассчитываются значения ошибок масштабных коэффициентов с учетом определенного времени полета, времени типовых участков траектории и максимальных значений возмущений на них.

Пример применения положений методики

При проведении расчетов была принята система исходных данных, приведенная ниже:

- Максимальная дальность полета, км 300
- Ошибка топопривязки, м 10
- Ошибка целеуказания, м 30
- Ошибка прицеливания, м 1
- Требуемая вероятность воздействия на малоразмерный объект одним ВДЛА 0,8
- Требуемое значение относительной площади воздействия на площадной объект 0,7
- Тип траектории Навесная (настильная)
- Приведенный радиус действия полезной нагрузки сосредоточенного действия, м 150
- Радиус зоны рассеивания кассетных элементов полезной нагрузки площадного действия, м . . . 200

Результаты анализа целевой обстановки позволяют сделать вывод о том, что главным предназначением современных и перспективных ВДЛА является воздействие на групповые (сложные) площадные стационарные и квазистационарные объекты. Основные результаты анализа целевой обстановки приведены на рис. 2 [8].

На основе результатов анализа были приняты следующие допущения:

- для полезной нагрузки сосредоточенного действия в качестве типовой цели принять малоразмерный (точечный) легкобронированный (небронированный) объект с временем нахождения на местности до трех часов;
- для полезной нагрузки сосредоточенного действия в качестве типовой принять площадной объект (среднее значение площади 6 Га), по степени защищенности — небронированный, по степени подвижности — время нахождения на местности до шести часов.

В результате анализа данных моделирования траектории движения ВДЛА были получены следующие показатели:

- определено время полета на максимальную дальность при навесной траектории $T_{навес\ max} = 328$ с;



Рис. 2. Анализ объектов воздействия

- определено время полета на максимальную дальность при настильной траектории $T_{настильн\ max} = 215$ с;
- выделены четыре характерных участка, применительно к которым определены основные возмущающие воздействия (табл. 2).

Исходя из продолжительности типовых участков T средние значения возмущений (ω_{cp} и a_{cp}) для общего времени полета будут составлять приблизительно:

$$\omega_{cp} = 32^\circ/c; a_{cp} = 6g.$$

На этапе анализа функционального состава системы управления определено, что рассматриваемая в данном примере система управления включает в своем составе БИНС и НАП СРНС, объединенные по разомкнутой схеме комплексной обработки навигационной информации.

Определение предельно допустимого отклонения ВДЛА, обусловленного ошибкой работы приборов системы управления. Применительно к полезной нагрузке сосредоточенного действия для оценки допустимой срединной суммарной ошибки пуска использована зависимость (1), разрешенная относительно E_p :

$$E_p = \sqrt{\frac{R_{пр}^2 \rho^2}{\ln(1 - P_{пор})}}, \tag{9}$$

где E_p — срединная суммарная ошибка полета, м; $R_{пр}$ — приведенный радиус воздействия полезной нагрузки ($S_{пр} = \pi R_{пр}^2$); ρ — значение аргумента, при котором функция Лапласа равна 0,5.

Применительно к полезной нагрузке площадного действия для оценки допустимой срединной суммарной ошибки полета использована зависимость (2), разрешенная относительно E_p :

$$E_p = \sqrt{\frac{\rho^2 R_{зр}^2}{\ln(1 - M_{ущ})} - \frac{0,117 S_{ц}}{\pi}}, \tag{10}$$

где $S_{ц}$ — площадь объекта воздействия; E_p — срединная суммарная ошибка полета, м; $R_{зр}$ — радиус зоны рассеивания кассетных элементов.

С использованием указанных зависимостей, а также принятых исходных данных были определены значения предельно допустимого отклонения ВДЛА, обусловленного ошибкой работы приборов системы управления (табл. 3).

Анализ данных табл. 3 позволяет сделать важный вывод о том, что определенная в качестве исходных данных вероятность воздействия может быть обеспечена в авто-

Таблица 3

Рассчитанные значения предельно допустимой ошибки работы приборов СУ в зависимости от дальности полета

Дальность полета, м	$E_{СПр}$, м	Полезная нагрузка сосредоточенного действия	Полезная нагрузка площадного действия
		$E_{СУ}$, м	
10 000	2,9	57,0	66,1
20 000	5,8	56,7	65,9
50 000	14,5	55,1	64,6
100 000	29,1	49,1	59,5
150 000	43,6	36,7	49,8
200 000	58,2	—	31,6
250 000	72,7	—	—
300 000	87,3	—	—

Таблица 4

Требования к чувствительным элементам БИНС

Гироскопы		Акселерометры		БИНС
Случайный дрейф, %/ч	Ошибки масштабного коэффициента S_x	Случайное смещение нулевого сигнала, г/ч	Ошибки масштаба	Точность юстировки, "
0,015	$5 \cdot 10^{-6}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	5

номном режиме работы БИНС при дальностях полета ВДЛА с полезной нагрузкой сосредоточенного действия на 150 км и для ВДЛА с полезной нагрузкой площадного действия — 200 км.

Формирование требований к допустимым значениям погрешностей чувствительных элементов БИНС. При допущении, что гироскопические датчики и акселерометры вносят равный вклад в суммарную ошибку БИНС, были рассчитаны значения показателей точности чувствительных элементов БИНС, приведенные в табл. 4.

Таким образом, результатом расчета по предложенной методике являются конечные значения не только допустимых уходов гироскопических датчиков и акселерометров, но и непосредственно параметры точности этих устройств, такие как нестабильность масштабного коэффициента, постоянный дрейф, случайный дрейф и др. Проведенный расчет позволил сделать вывод об ограниченной возможности применения БИНС в автономном режиме, следовательно, для обеспечения требуемых значений вероятности поражения целей на больших дальностях пуска ВДЛА необходимо применять технологии комплексирования бортовой аппаратуры систем управления.

Заключение

Положения разработанной методики позволяют оценить возможность применения БИНС в составе систем управления ракет в зависимости от перечня решаемых задач, предполагаемой максимальной дальности пусков и динамики полета, а также оценить влияние методических (на основе данных принятой модели Земли) и шумовых составляющих погрешностей чувствительных элементов измерительного блока БИНС на точность определения навигационных параметров.

Кроме того, положения методики позволяют комплексно охватывать процесс обоснования требований к точности датчиков угловых и линейных параметров движения ракет (реактивных снарядов), а также в последующем определять значение предельно допустимого отклонения ракеты, обусловленного ошибкой работы приборов комплексированной системы управления.

Задача выбора оптимального алгоритма комплексной обработки навигационных сигналов, рационального распределения вычислительных мощностей может решаться непосредственно в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ). Исходные данные для принятия таких решений могут быть представлены в виде некоторого вектора исходных состояний, компоненты которого будут определяться рядом факторов, к которым в первом приближении следует отнести:

- тип траектории (баллистическая, настильная);
- закон управления (программный, терминальный);
- фоно-целевая обстановка (положение точки старта, дальность полета, тип объекта воздействия, наблюдаемость горизонта СРНС);
- техническое состояние как отдельных подсистем КСУ, так и систем и блоков объекта управления в целом.

На основании оценки вектора исходного состояния в БЦВМ могут быть выработаны решения:

- о возможности или невозможности "горячего старта";
- о выборе алгоритма комплексной обработки навигационных параметров;
- о назначении приоритета навигационных данных определенного источника;
- о выделении вычислительных ресурсов различным навигационным алгоритмам на всех этапах функционирования.

Список литературы

1. Разоренов Г. Н., Бахрамов Э. А., Титов Ю. Ф. Системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 2003. 584 с.
2. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем: учебник / В. Н. Бранец, И. П. Шмыгловский. М.: Наука, 1992. 280 с.
3. Земсков А. В., Колесниченко С. В. Актуальные вопросы совершенствования систем управления ракет // Научно-практическое издание "Михайловец". Вып. № 8. СПб.: МВАА, 2003. С. 67—71.
4. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Под ред. Б. С. Алешина, К. К. Еремеев, А. И. Черноморского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 424 с.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
6. Бабич О. А. Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.
7. Мальшев В. В., Красильщиков М. Н., Карлов В. И. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1989. 312 с.
8. Поздеев С. В., Колесниченко С. В. Имитационная модель функционирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы ракет // Матер. III Всеросс. НТК БГТУ ("ВОЕНМЕХ" имени Д. Ф. Устинова), "Фундаментальные основы баллистического проектирования". Т. 2. СПб.: БГТУ, 2012. С. 72—78.
9. Злотников К. А., Попова И. В., Пяташев Е. Н. Применение микромеханических датчиков навигационных параметров в СУЛА // Тр. Междунар. науч. конф. "Анализ, прогнозирование и управление в сложных системах". СПб.: СЗТУ, 2003. С. 311—326.

To Develop Methods Substantiation of Requirements to Accuracy Sensitive Elements Complexioned Control Systems of High Mobile Objects

The article considers the process of formation of accuracy sensitive and reinforcement and transforming elements of the onboard equipment with respect to prospective strapdown inertial navigation systems (SINS) highly dynamic aircraft (HDA).

The aim of the research is detailed study of the provisions of methodological substantiation of requirements to accuracy of the sensitive elements of control systems on the basis of beans.

The main tasks of the research was the following:

analysis of the conditions of application of highly dynamic aircraft; analysis of structure and composition of on-Board equipment control systems highly dynamic aircraft;

the study of dependencies maximum allowable deviations of HDA;

formation of requirements to permissible values of errors sensitive elements beans;

identify features of practical application of proposed scientific and methodological apparatus for investigation of the processes of formation of the accuracy of HDA.

Statements of the developed methods allow to calculate the values are not only valid care gyroscopic sensors, but also directly the accuracy parameters of these devices, such as the instability of the scale factor, the constant drift, random drift, and others. Generally, the proposed methodological apparatus allows us to evaluate the possibility of using beans as part of control systems of moving objects depending on the assumed maximum distance and driving dynamics and to assess the impact of methodical (based on the accepted model of the Earth) and noise components errors sensitive elements of the measuring unit beans on the accuracy of determination of navigation parameters.

Keywords: the trajectory of motion, moving subject, autonomous navigation, integration, control system, sensor, SINS, methods, accuracy, efficiency

References

1. **Razorenov G. N., Bakhranov E. A., Titov Yu. F.** Sistemy upravleniya letatel'nymi apparatami. M.: Mashinostroenie, 2003. 584 p.
2. **Vvedenie** v teoriyu besplatformennykh inertsiyal'nykh navigatsionnykh sistem: uchebnik / V. N. Branets, I. P. Shmyglovskiy. M.: Nauka, 1992. 280 p.
3. **Zemskov A. V., Kolesnichenko S. V.** Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya sistem upravleniya raket. *Nauchno-prakticheskoe izdanie "Mikhaylovets"*. N. 8. SPb.: MVAA, 2003. P. 67–71.
4. **Orientatsiya** i navigatsiya podvizhnykh ob'ektov: sovremennye informatsionnye tekhnologii / Pod red. B. S. Aleshina, K. K. Eremeenko, A. I. Chernomorskogo. M.: FIZMATLIT, 2006. 424 p.
5. **GLONASS**. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya / Pod red. A. I. Perova, V. N. Kharisova. M.: Radiotekhnika, 2010. 800 p.
6. **Babich O. A.** Obrabotka informatsii v navigatsionnykh kompleksakh. — M.: Mashinostroenie, 1991. 512 p.
7. **Malyshev V. V., Krasil'shchikov M. N., Karlov V. I.** Optimizatsiya nablyudeniya i upravleniya letatel'nykh apparatov. M.: Mashinostroenie, 1989. 312 p.
8. **Pozdeev S. V., Kolesnichenko S. V.** Imitatsionnaya model' funktsionirovaniya besplatformennoy inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy raket. *Mater. III Vseross. NTK BGTU ("VOENMEKH" imeni D. F. Ustinova), "Fundamental'nye osnovy ballisticheskogo proektirovaniya"*. Iss. 2. SPb.: BGTU, 2012. P. 72–78.
9. **Zlotnikov K. A., Popova I. V., Pyatyshev E. N.** Primenenie mikromekhanicheskikh datchikov navigatsionnykh parametrov v SULA. *Tr. Mezhdunar. nauch. konf. "Analiz, prognozirovaniye i upravlenie v slozhnykh sistemakh"*. SPb.: SZTU, 2003. P. 311–326.

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 30.07.2014. Подписано в печать 04.09.2014. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1014. 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"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.