

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Том 18  
2017  
№ 10

Рисунки к статье А. В. Бобрякова, А. В. Зуева, А. А. Кабанова, Б. Каталанича, В. Е. Пряничникова, С. М. Стажкова, В. Ф. Филаретова, В. Г. Хомченко  
«ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ И В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ  
ПРИ ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ»



Рис. 5. Движение робота Robotino в среде с препятствиями

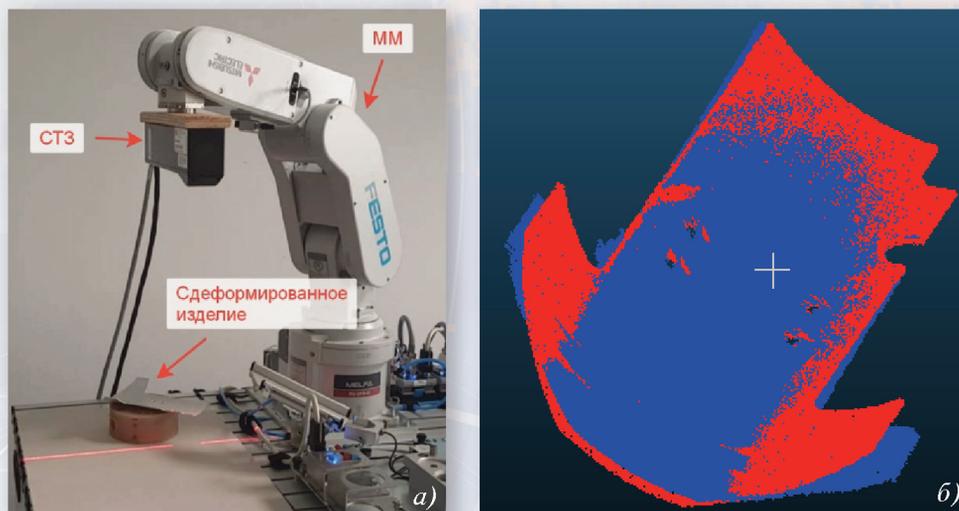


Рис. 6. Иллюстрация сканирования произвольно деформированной детали с помощью СТЗ (а) и получения компьютерных моделей (б) в виде облаков точек эталонной (красное облако) и деформированной (синее облако) детали

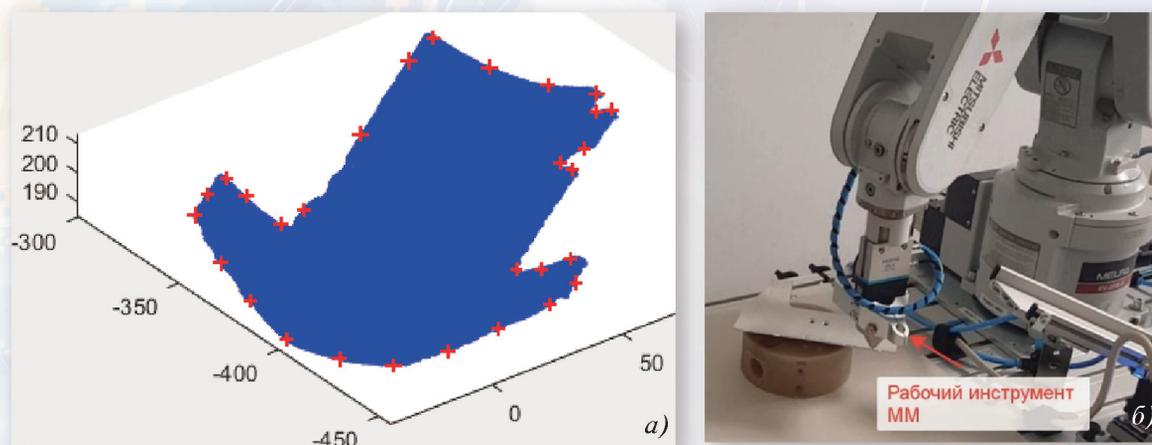


Рис. 7. Иллюстрация процедур переноса точек обработки (красные кресты) с САД-модели на полученную при сканировании модель деформированной детали (а) и реализации траектории обработки рабочим инструментом ММ (б)

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 18

2017

№ 10

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

## Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, prof.  
GROUMPOS P. P., prof.  
JEN-HWA GUO, PhD, prof.  
KATALINIC B., PhD, prof.  
SUBUDHNI 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.  
ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН, проф.,  
КАЛЯЕВ И. А., акад. 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., акад. 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.  
ЮЩЕНКО 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.  
ЕРМОЛОВ И. Л., д. т. н., доц.  
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. н., 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

### РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Краснощеченко В. И.** Синтез простого робастного регулятора для финитного управления гибким однозвенным манипулятором . . . . . 651
- Лютюв А. Г., Рябов Ю. В.** Синтез технологического процесса для роботизированного комплекса на основе знаний . . . . . 660
- Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И., Крахмалев Г. Н.** Математические модели систем управления для калибровки ориентации инструмента промышленных роботов 664

### КОНТРОЛЬ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

- Гулай А. В., Зайцев В. М.** Интеллектуальные технологии оперативного функционального контроля многопараметрических систем. . . . . 670
- Климина Л. А., Шалимова Е. С.** Двухпропеллерная ветроэнергетическая установка с дифференциальной планетарной передачей . . . . . 679
- Еременко Ю. И., Глущенко А. И., Петров В. А.** Об использовании нейросетевого настройщика для адаптации П регулятора скорости электропривода прокатной клетки . . . . . 685

### СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

- Инсаров В. В., Сафонов В. А., Тихонова С. В.** Использование безэталонных метрик для оценки качества текущих изображений многообъектных стационарных наземных сцен. Часть 2 . . . . . 693

### УПРАВЛЕНИЕ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Распопов В. Я., Шведов А. П.** Резервная бесплатформенная система ориентации на отечественных микромеханических инерциальных датчиках . . . . . 699
- Корсун О. Н., Стуловский А. В., Канышев А. В.** Анализ движения самолетов на закритических углах атаки: коррекция погрешностей бортовых измерений и моделирование отклоняемого вектора тяги . . . . . 705

### СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ В ОБЛАСТИ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ

- Бобряков А. В., Зуев А. В., Кабанов А. А., Каталинич Б., Пряничников В. Е., Стажков С. М., Филаретов В. Ф., Хомченко В. Г.** Особенности и возможности использования сетевых технологий в учебном процессе и в научных исследованиях при подготовке инженерных кадров различного уровня . . . . . 712

*Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора 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](mailto:mech@novtex.ru)

# MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



## MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

**Editorial Council:**

ALIEV T. A., prof., Azerbaijan, Baku  
 ANSHAKOV G. P., Russia, Samara  
 BOLOTNIK N. N., Russia, Moscow  
 CHENTSOV A. G., Russia, Ekaterinburg  
 CHERNOUSKO F. L., Russia, Moscow  
 CHYI-YEU LIN, PhD, Prof., Taiwan, Taipei  
 FEDOROV I. B., Russia, Moscow  
 GROUMPOS P. P., prof., Greece, Patras  
 JEN-HWA GUO, PhD, Prof., Taiwan, Taipei  
 KALYAEV I. A., Russia, Taganrog  
 KATALINIC B., PhD, Prof., Austria, Vienna  
 KRASNEVSKIY L. G., Belarus, Minsk  
 KUZNETSOV N. A., Russia, Moscow  
 LEONOV G. A., Russia, S.-Peterburg  
 MATVEENKO A. M., Russia, Moscow  
 MIKRIN E. A., Russia, Moscow  
 PESHEKHONOV V. G., Russia, S.-Peterburg  
 REZCHIKOV A. F., Russia, Saratov  
 SCHERBATYUK A. F., Russia, Vladivostok  
 SEBRYAKOV G. G., Russia, Moscow  
 SIGOV A. S., Russia, Moscow  
 SOJFER V. A., Russia, Samara  
 SOLOMENTSEV Yu. M., Russia, Moscow  
 SOLOVJEV V. A., Russia, Moscow  
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India, Sundargarh  
 VASILYEV S.N., Russia, Moscow  
 YUSUPOV R. M., Russia, S.-Peterburg  
 ZHELTOV S. Yu., Russia, Moscow

**Editor-in-Chief:**

FILIMONOV N. B., Russia, Moscow

**Deputy Editor-in-Chief:**

PODURAEV Yu. V., Russia, Moscow  
 PUTOV V. V., Russia, S.-Peterburg  
 YUSCHENKO A. S., Russia, Moscow

**Responsible Secretary:**

BEZMENOVA M. Yu., Russia, Moscow

**Editorial Board:**

ALEXANDROV V. V., Russia, Moscow  
 ANTONOV B. I., Russia, Moscow  
 ARSHANSKY M. M., Russia, Tver  
 BUKOV V. N., Russia, Zhukovsky  
 ERMOLOV I. L., Russia, Moscow  
 FILARETOV V. F., Russia, Vladivostok  
 FRADKOV A. L., Russia, S.-Peterburg  
 FURSOV V. A., Russia, Samara  
 GRADETSKY V. G., Russia, Moscow  
 ILYASOV B. G., Russia, Ufa  
 IVCHENKO V. D., Russia, Moscow  
 KOLOSOV O. S., Russia, Moscow  
 KOROSTELEV V. F., Russia, Vladimir  
 LEBEDEV G. N., Russia, Moscow  
 LOKHIN V. M., Russia, Moscow  
 PAVLOVSKY V. E., Russia, Moscow  
 PROKHOROV N. L., Russia, Moscow  
 PSHIKHOPOV V. Kh., Russia, S.-Peterburg  
 RAPOPORT E. Ya., Russia, Samara  
 SERGEEV S. F., Russia, S.-Peterburg  
 VITTIKH V. A., Russia, Samara  
 YUREVICH E. I., Russia, S.-Peterburg

**Editorial Staff:**

GRIGORIN-RYABOVA E.V., Russia, Moscow

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and perspectives development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

## CONTENTS

### ROBOTIC SYSTEMS

- Krasnoshchechenko V. I.** Synthesis of a Simple Robust Regulator for the Rest-to-Rest Motion Control of a Flexible Single-link Manipulator . . . . . 651  
**Lutov A. G., Ryabov Y. V.** Synthesis of the Technological Process for a Robotic Complex on the Basis of Knowledge . . . . . 660  
**Krakhmalev O. N., Petreshin D. I., Krakhmalev G. N.** Mathematical Models of the Control Systems for Calibration of the Tools' Orientation for the Industrial Robots . . . . . 664

### CONTROL AND AUTOMATION IN MECHATRON SYSTEMS

- Gulay A. V., Zaitsev V. M.** Intelligent Technologies for an Operative Functional Control of the Multivariable Systems . . . . . 670  
**Klimina L. A., Shalimova E. S.** Dual-Propeller Wind Turbine with a Differential Planetary Gear 679  
**Eremenko Yu. I., Glushchenko A. I., Petrov V. A.** Concerning the Use of a Neural Tuner for Adjustment of the Speed P-controller of a Rolling Mill's Main Drive . . . . . 685

### SYSTEMS OF TECHNICAL VISION

- Inсарov V. V., Safonov V. A., Tikhonova S. V.** Application of the Non-Reference Metrics for the Quality Estimation of the Current Images of the Stationary Ground Multi-object Scenes. Part 2 . . . . . 693

### CONTROL IN AEROSPACE SYSTEMS

- Raspopov V. Ya., Shvedov A. P.** Backup Platformless Orientation System Based on Domestic Micromechanical Inertial Sensors . . . . . 699  
**Korsun O. N., Stulovsky A. V., Kanyshv A. V.** Analysis of the Aircraft Motion at the Overcritical Angles of Attack: Errors of the On-Board Measurements and Simulation of the Deviated Thrust Vector . . . . . 705

### NETWORK TECHNOLOGIES IN EDUCATIONAL PROCESS IN MECHATRONICS AND ROBOTICS

- Bobyakov A. V., Zuev A. V., Kabanov A. A., Katalinic B., Pryanichnikov V. E., Stazkov S. M., Filaretov V. F., Homchenko V. G.** Specific Features and Opportunities of Employment of the Network Technologies in the Educational Process and Scientific Research for Training of Engineers of Various Levels . . . . . 712

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

**В. И. Краснощеченко**, канд. техн. наук, доц., [kviip@yandex.ru](mailto:kviip@yandex.ru),  
Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана

## Синтез простого робастного регулятора для финитного управления гибким однозвенным манипулятором

*Рассматривается задача перевода гибкого однозвенного манипулятора из одного состояния покоя в другое за заданное время. В работе проводится подробный анализ объекта управления и предлагается использовать входное задающее воздействие особого вида с низкочастотным спектром, обеспечивающее практическое отсутствие вибраций схвата, плавность и точность перехода во всем диапазоне нагрузок схвата. При этом используется простой регулятор первого порядка с сигналом обратной связи только по углу привода. Приводятся результаты моделирования.*

**Ключевые слова:** гибкий манипулятор, синтез регулятора, робастность, метод разделения переменных

### Введение

Современные промышленные роботы-манипуляторы проектируются на основе использования достаточно жестких звеньев, что позволяет пренебречь деформациями при рабочих операциях. Применение роботов с облегченными гибкими звеньями имеет ряд преимуществ: увеличенная нагрузочная способность; увеличенная скорость перемещения; повышенная безопасность; уменьшение потребления энергии; увеличение рабочего пространства с использованием удлинённых звеньев; снижение стоимости.

Однако гибкость звеньев создает ряд проблем, из которых следует выделить две основные:

1) высокий (теоретически бесконечный, так как гибкий манипулятор описывается уравнениями в частных производных) порядок системы;

2) между схватом (концом звена) и приложенным моментом привода на другом конце звена имеет место неминимально фазовая динамика, что является серьезным препятствием для достижения как высокого качества, так и робастности по отношению к переменной нагрузке схвата. Неминимально фазовая динамика проявляется в том, что имеет место несогласованность в общем случае движений привода и схвата (в западной литературе этот эффект получил название "noncollocated", когда датчик устанавливается на схвате, а управление подается на привод).

Если решение первой проблемы заключается в конечной аппроксимации уравнения в частных производных системой обыкновенных дифференциальных линейных уравнений, учитывающих наиболее значимые гибкие моды манипулятора, то решение второй сводится к минимальному проявлению или, лучше, полному исключению неминимальной фазовости.

Рассмотрим задачу перевода гибкого однозвенного манипулятора (ГОЗМ) из одного состояния

покоя в другое за заданное время. Здесь используются различные подходы: 1) формирование необходимого входного воздействия [1, 2]; 2) синтез регулятора с использованием обратной задачи динамики [3–5]; 3) снижение уровня резонансных частот гибкого манипулятора за счет регулирования изгибающего момента звена в заделке ступицы привода [6]; 4) методы робастного управления [7].

Первый подход состоит в сочетании входного задающего воздействия (в основном ступенчатого вида) с импульсами, формируемыми в определенные моменты времени для подавления возбуждаемых гибких частотных мод. Данный метод используется как для одной, так и для нескольких мод, но сложность его реализации растет с увеличением числа учитываемых мод. Он также вводит некоторую транспортную задержку в практической реализации.

Второй метод решает обычную обратную задачу динамики, где выбирается гладкая желаемая траектория перехода схвата, а затем вход-выходным обращением определяется желаемое входное воздействие в частотной или временной области. Однако результирующий вход (момент на выходе привода) иногда бывает физически не реализуемым. В статье [4] предлагается решить эту проблему выбором вспомогательного выхода с максимальной относительной степенью, которая обеспечит воздействие только на самую высокую производную выхода. В этом случае передаточная функция между входом ГОЗМ (выходной момент привода) и вспомогательным выходом не будет иметь нулей (отсутствует неминимальная фазовость), что позволяет, по мнению авторов, получить хорошее качество терминального управления при повороте манипулятора на заданный угол. Экспериментальные результаты по данному алгоритму представлены в работе [5], где для учета изменения массы нагрузки при движении ГОЗМ по желаемой траектории авторы предлагают

использовать ПД регулятор. Однако заметим, что перевод манипулятора на любой иной, отличный от ранее рассчитанного, угол требует нахождения новой передаточной функции, так как ее коэффициенты зависят от времени и требуемого конечного угла перевода ГОЗМ. Кроме того, необходимы два датчика: энкодер на привод и акселерометр на схват.

В работе [6] авторы предлагают использовать двухконтурное управление ГОЗМ. Внутренний контур имеет регулятор, который включает ПД регулятор и добавку, компенсирующую изгибающий момент звена в заделке привода. Данный контур предназначен для робастного управления манипулятором по отношению к моменту сухого трения привода. Внешний контур содержит регулятор, обеспечивающий робастность по отношению к возбуждаемым гибким модам манипулятора. Система управления имеет два датчика: энкодер для измерения угла поворота привода и мостовую схему из тензодатчиков для измерения изгибающего момента в месте крепления звена манипулятора к ступице привода.

В монографии [7] представлен алгоритм синтеза робастного  $\mu$ -регулятора для гибкого манипулятора с интервально неопределенными массой нагрузки и коэффициентами демпфирования привода и гибкого звена. Спроектированный регулятор имеет двадцать восьмой порядок. В системе управления установлены два датчика: энкодер на приводе и акселерометр на схвате.

В данной статье используется первый подход, но с необходимой модификацией. Здесь:

- формируется желаемое входное воздействие в низкочастотной области, до первой гибкой моды;
- синтезируется простой регулятор *первого* порядка с обратной связью только по углу привода, что обеспечивает перевод ГОЗМ из исходного нулевого углового положения в любое другое угловое положение  $\theta(t_1) \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$  за заданное, но учитывающее динамические характеристики ГОЗМ, время, при *любой* нагрузке  $m_L \in [0, m_L^{\max}]$  и с хорошим качеством.

### Постановка задачи

Рассмотрим схематическое изображение движения ГОЗМ (объекта управления) в горизонтальной плоскости (рис. 1), где  $XOY$  — неподвижная система координат (СК);

$xOy$  — локальная (подвижная) СК (ось  $0x$  является касательной к деформируемому ГОЗМ в месте его крепления к приводе; является осью вращения абсолютно жесткого недеформируемого звена);

$J_0$  — момент инерции привода ГОЗМ [кг · м<sup>2</sup>];

$m_L$  — точечная масса нагрузки схвата (т. е. считаем момент инерции нагрузки нулевым) [кг];

$\theta(t) = \theta_c(t)$  — текущий угол поворота ГОЗМ как абсолютно жесткого тела, угол поворота привода [рад];

$\theta_c(t)$  — текущий угол поворота схвата с нагрузкой [рад];

$w(x, t)$  — гибкое отклонение ГОЗМ от оси  $0x$  в текущей точке  $x$  манипулятора  $x \in [0, L]$ , перпендикулярное к данной оси [м];

$L$  — длина манипулятора [м];

$\rho$  — погонная (линейная) массовая плотность ГОЗМ [кг/м];

$I$  — момент инерции поперечного сечения звена манипулятора [м<sup>4</sup>];

$E$  — модуль упругости Юнга для материала звена [Н/м<sup>2</sup>].

Предположения:

- прямоугольное сечение звена манипулятора имеет высоту  $h$ , значительно превышающую ее ширину  $b$ ,  $h \gg b$  (рис. 2);
- вертикальные деформации при повороте ГОЗМ в горизонтальной плоскости отсутствуют (абсолютная вертикальная жесткость);
- длина звена манипулятора значительно превышает высоту его поперечного сечения,  $L \gg h$ .

Конкретные значения параметров рассматриваемого ГОЗМ:

- материал: алюминий;
- длина  $L = 1$  м;
- высота  $h = 0,05$  м;
- ширина  $b = 0,0055$  м;
- модуль Юнга  $E = 6,9 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>;
- погонная (линейная) массовая плотность  $\rho = 0,743$  кг/м;
- момент инерции привода (двигатель и редуктор)  $J_0 = 0,1$  кг · м<sup>2</sup>;

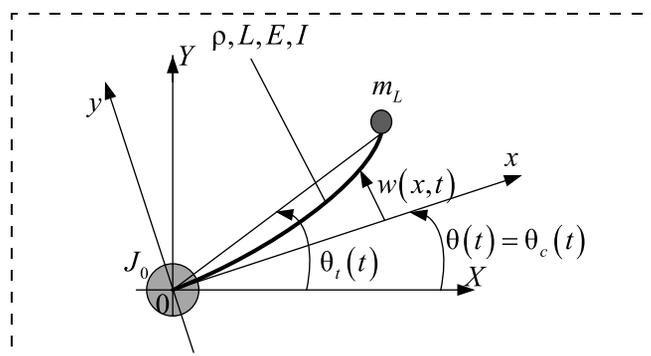


Рис. 1. Схематическое изображение движения ГОЗМ в горизонтальной плоскости

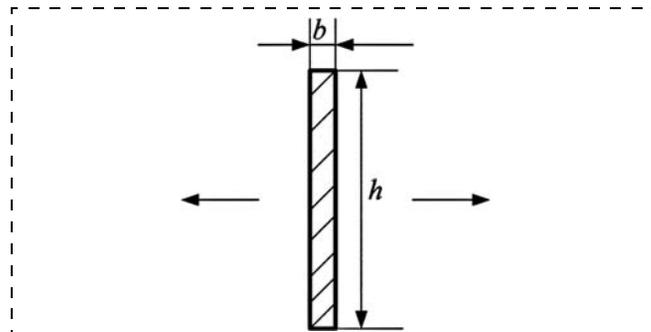


Рис. 2. Поперечное сечение звена манипулятора

- момент инерции поперечного сечения звена

$$I = \frac{hb^3}{12} = 0,693 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4;$$

- нагрузка  $m_L \in [0; 0,5]$  кг.

Требуется синтезировать робастный регулятор, обеспечивающий перевод ГОЗМ из исходного нулевого углового положения в любое другое угловое положение  $\theta(t_1) \in [9^\circ; 180^\circ]$  при *любой* нагрузке  $m_L \in [0; 0,5]$  кг со следующими показателями качества: а) время перевода не более 3 с; б) перерегулирование не более 10 %.

### Математическая модель свободного углового движения ГОЗМ

Исследования по применению гибких манипуляторов с применением соответствующих математических моделей ведутся уже давно и, тем не менее, до сих пор для одних и тех же исходных по строению гибкого манипулятора данных имеются различные математические модели, отличающиеся по граничным условиям (особенно это касается заделки звена (балки) на ступице привода) и совпадающие только по описанию движения упругой балки уравнением Эйлера—Бернулли. Это можно проследить по работам [1—7]. Автором на основе принципа наименьшего действия Гамильтона получена математическая модель [8], которая совпадает с моделью, представленной без вывода в монографии [7] в разделе "Robust Control of a Flexible-Link Manipulator", и описывается уравнением Эйлера—Бернулли

$$\rho \ddot{w}(x, t) + EI w''''(x, t) = 0 \quad (1)$$

со следующими граничными условиями:

- наличие перерезывающей силы на правом конце от действия сил инерции нагрузки:

$$m_L \ddot{w}(L, t) - EI w''''(L, t) = 0; \quad (2)$$

- свободный правый конец (нет изгибающего момента, момент инерции нагрузки равен нулю)

$$w''(L, t) = 0; \quad (3)$$

- жесткая заделка на левом конце [9]:

$$w(0, t) = 0; \quad (4)$$

$$w'(0, t) = 0. \quad (5)$$

Используя метод Фурье (метод разделения переменных) решения уравнения (2) в виде бесконечного ряда

$$w(x, t) = \sum_{i=0}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t), \quad (6)$$

где  $\phi_i(x)$  — собственные функции (гибкие моды),  $q_i(t)$  — обобщенные координаты, а также условия ортогональности

$$\int_0^L \rho \phi_i(x) \phi_j(x) dx + m_L \phi_i(L) \phi_j(L) = \delta_{ij}; \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad (7)$$

получаем уравнение

$$(\cos(\beta L) \text{sh}(\beta L) - \sin(\beta L) \text{ch}(\beta L)) m_L \beta + (\cos(\beta L) \text{ch}(\beta L) + 1) \rho = 0, \quad (8)$$

для нахождения частот  $\beta_i, i = 1, 2, \dots$ , а затем из формулы

$$\omega_i = \beta_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (9)$$

находим собственные частоты свободных колебаний ГОЗМ. В табл. 1 приведены собственные частоты первых четырех гибких мод ГОЗМ для различных нагрузок  $m_L$ , а на рис. 3 представлены первые четыре гибкие моды (собственные функции) для нагрузки  $m_L = 0,5$  кг.

Из табл. 1 следует, что изменение нагрузки наибольшим образом влияет на частоту первой моды. Кроме того, видно, что частоты каждой из мод значительно отличаются друг от друга.

Рассмотрим угловое перемещение звена манипулятора под действием внешнего вращающего момента  $\tau(t)$ . В этом случае работа внешних обобщенных сил имеет вид

$$W = \tau \theta,$$

где  $\theta = \theta_c$  — угол поворота ГОЗМ под действием момента  $\tau$ , рассматриваемого как абсолютно жесткое тело (угол поворота привода манипулятора). Теперь

Таблица 1

Собственные частоты ГОЗМ при различных значениях нагрузки схвата

$m_L$ , кг	$\omega_1$ , рад/с	$\omega_2$ , рад/с	$\omega_3$ , рад/с	$\omega_4$ , рад/с
0	28,2	176,9	495,2	970,4
0,1	22,7	151,4	438,5	879,2
0,2	19,5	142,4	424,2	861,6
0,3	17,3	137,8	417,7	854,3
0,4	15,8	135,0	414,1	850,3
0,5	14,6	133,1	411,8	847,8

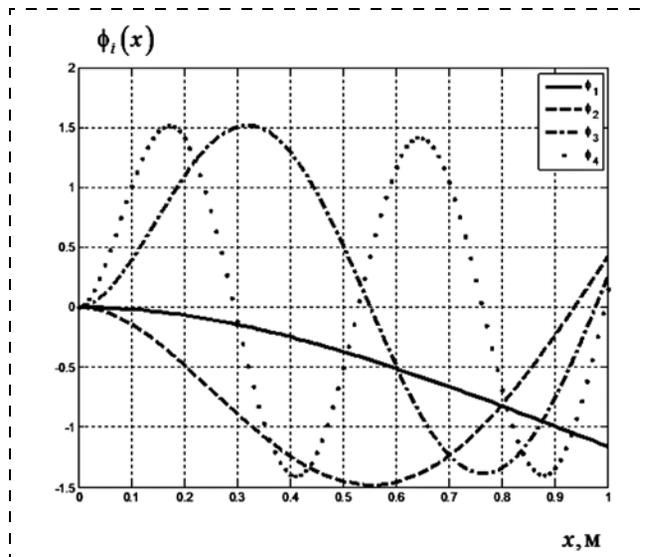


Рис. 3. Собственные функции ГОЗМ для нагрузки  $m_L = 0,5$  кг

при повороте общее перемещение любой точки  $x \in [0, L]$  деформированного звена манипулятора определяется из соотношения

$$y(x, t) = x\theta(t) + w(x, t).$$

Применяя тот же принцип наименьшего действия и метод Фурье, получаем уравнения движения ГОЗМ при наличии внешнего управляющего момента

$$\Sigma: J_{\Sigma} \ddot{\theta}(t) + \gamma \dot{\theta}(t) + \sum_{i=1}^{n_f} a_i \ddot{q}_i(t) = \tau(t),$$

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) + a_i \ddot{\theta}(t) = 0,$$

$$i = 1, 2, \dots, n_f \quad (10)$$

где

$$J_{\Sigma} = J_0 + \frac{\rho L^3}{3} + m_L L^2;$$

$$a_i = \int_0^L \rho x \phi_i(x) dx + m_L L \phi_i(L), \quad i = 1, 2, \dots, n_f \quad (11)$$

$\infty > n_f \geq 1$  — число учитываемых форм собственных колебаний (гибких мод);  $\gamma$  — коэффициент вязкого трения привода,  $0 \leq \xi_i < 1$ ,  $i = 1, \dots, n_f$  — коэффициенты демпфирования гибких мод ГОЗМ.

Считаем, что измеряется только одна переменная — угол поворота привода

$$y(t) = \theta_c(t), \quad (12)$$

а регулируемой переменной является угол поворота схвата

$$z(t) = \theta_r(t) = \theta_c(t) + \arctg \frac{w(L, t)}{L} \approx \theta_c(t) + \frac{\sum_{i=1}^{n_f} \phi_i(L) q_i(t)}{L}. \quad (13)$$

В формуле (13) учтено, что  $\arctg x \approx x$  для малых деформаций  $x = w(L, t)/L$ .

Из выражений (10)—(13) получаем передаточные функции от управляющего момента  $\tau$  к измеряемой  $\theta_c$  и регулируемой  $\theta_r$  переменным. Для  $n_f = 2$ ,  $\gamma = 0,028 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$ ,  $\xi_1 = 0,0001$ ;  $\xi_2 = 0,001$  имеем:

а) нагрузка  $m_L = 0 \text{ кг}$

$$W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s) = \frac{6,076s^4 + 2,184s^3 + 1,949 \cdot 10^5 s^2 + 2784s + 1,514 \cdot 10^8}{s(s^5 + 0,545s^4 + 3,380 \cdot 10^4 s^3 + 6424s^2 + 5,260 \cdot 10^7 s + 4,238 \cdot 10^6)};$$

$$W_{\tau \rightarrow \theta_r}(s) = \frac{1,763s^4 + 0,373s^3 + 3,501 \cdot 10^4 s^2 + 2784s + 1,514 \cdot 10^8}{s(s^5 + 0,545s^4 + 3,380 \cdot 10^4 s^3 + 6424s^2 + 5,260 \cdot 10^7 s + 4,238 \cdot 10^6)};$$

б) нагрузка  $m_L = 0,5 \text{ кг}$

$$W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s) = \frac{6,049s^4 + 1,628s^3 + 1,085 \cdot 10^5 s^2 + 653,9s + 2,274 \cdot 10^7}{s(s^5 + 0,463s^4 + 1,966 \cdot 10^4 s^3 + 3591s^2 + 1,927 \cdot 10^7 s + 6,367 \cdot 10^5)};$$

$$W_{\tau \rightarrow \theta_r}(s) = \frac{0,502s^4 + 0,091s^3 + 6184s^2 + 653,9s + 2,274 \cdot 10^7}{s(s^5 + 0,463s^4 + 1,966 \cdot 10^4 s^3 + 3591s^2 + 1,927 \cdot 10^7 s + 6,367 \cdot 10^5)}.$$

Нули и полюса для различных значений нагрузки обеих передаточных функций приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что при наличии нагрузки  $m_L > 0$  передаточная функция по регулируемой переменной  $W_{\tau \rightarrow \theta_r}(s)$  становится неминимально фазовой (в табл. 2 выделен столбец с правыми нулями), а по измеряемой переменной остается минимально фазовой. Отметим, что если передаточные функции по измеряемой и регулируемой переменным представлены дробно-рациональными функциями

$$W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s) = \frac{B_1(s)}{A(s)}; \quad W_{\tau \rightarrow \theta_r}(s) = \frac{B_2(s)}{A(s)},$$

Таблица 2

Полюса и нули передаточных функций  $W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s)$ ,  $W_{\tau \rightarrow \theta_r}(s)$  при различных нагрузках  $m_L$  схвата

$m_L$ , кг	Нули $W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s)$	Нули $W_{\tau \rightarrow \theta_r}(s)$	Полюса $W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s)$ , $W_{\tau \rightarrow \theta_r}(s)$
0	$-0,18 \pm j176,9 \pm j28,2$	$-0,09 \pm j116,2 - 0,02 \pm j79,8$	$-0,18 \pm j179,4 - 0,05 \pm j40,4 - 0,08; 0$
0,1	$-0,15 \pm j151,4 \pm j22,7$	$-10,7 \pm j87,4 10,7 \pm j87,3$	$-0,16 \pm j154,4 - 0,06 \pm j36,7 - 0,06; 0$
0,2	$-0,14 \pm j142,4 \pm j19,5$	$-14,8 \pm j83,8 14,7 \pm j83,8$	$-0,15 \pm j145,5 - 0,06 \pm j34,7 - 0,05; 0$
0,3	$-0,14 \pm j137,8 \pm j17,4$	$-16,1 \pm j82,0 16,0 \pm j82,0$	$-0,15 \pm j141,0 - 0,07 \pm j33,6 - 0,04; 0$
0,4	$-0,13 \pm j135,0 \pm j15,8$	$-16,8 \pm j80,9 16,7 \pm j81,0$	$-0,15 \pm j138,3 - 0,07 \pm j32,8 - 0,04; 0$
0,5	$-0,13 \pm j133,1 \pm j14,6$	$-17,2 \pm j80,2 17,1 \pm j80,3$	$-0,14 \pm j136,5 - 0,07 \pm j32,3 - 0,03; 0$

тогда передаточная функция от угла поворота привода к углу поворота схвата имеет вид

$$W_{\theta_c \rightarrow \theta_t}(s) = \frac{B_2(s)}{B_1(s)}, \quad (14)$$

т. е. нули передаточной функции  $W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s)$  становятся полюсами  $W_{\theta_c \rightarrow \theta_t}(s)$ .

Формулу (14) будем использовать для получения выходного регулируемого сигнала при управлении по измеряемой переменной.

**Анализ динамических характеристик.** Для анализа динамических характеристик ГОЗМ рассмотрим частотные характеристики каждого из каналов. На рис. 4, 5 приведены логарифмические частотные характеристики для предельных значений нагрузки.

На рис. 6 представлены логарифмические частотные характеристики для передаточной функции  $W_{\theta_c \rightarrow \theta_t}(s)$  при предельных нагрузках.

Частотные характеристики объекта управления (см. рис. 4, 5) показывают, что в области очень низких частот оба канала ( $W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s)$ ,  $W_{\tau \rightarrow \theta_t}(s)$ ) представляют собой чистые интеграторы, а в диапазоне  $\omega \in [0, 1; 10]$  рад/с практически являются двойными интеграторами. Кроме того, в этом частотном диапазоне практически нет сдвига фаз по каналу  $W_{\theta_c \rightarrow \theta_t}(s)$  (рис. 6, б). Однако ЛАЧХ этого канала имеет гораздо меньший частотный интервал (примерно от 0 до 5 рад/с) с коэффициентом, близким к единице (рис. 6, а).

**К вопросу синтеза управляющего воздействия.** Необходимость использования особого входного управляющего сигнала демонстрируют результаты моделирования выходных реакций ГОЗМ на тестовый импульсный входной сигнал при нагрузке  $m_L = 0,5$  кг (рис. 7). Они показывают наличие слабодемпфированных колебаний выходных сигналов при ступенчатых изменениях входного сигнала. Поэтому основной задачей синтеза регулятора будем считать выработку управляющего воздействия, обеспечивающего максимально возможное быстрое действие и при этом не вызывающего слабодемпфированных колебаний гибких мод манипулятора.

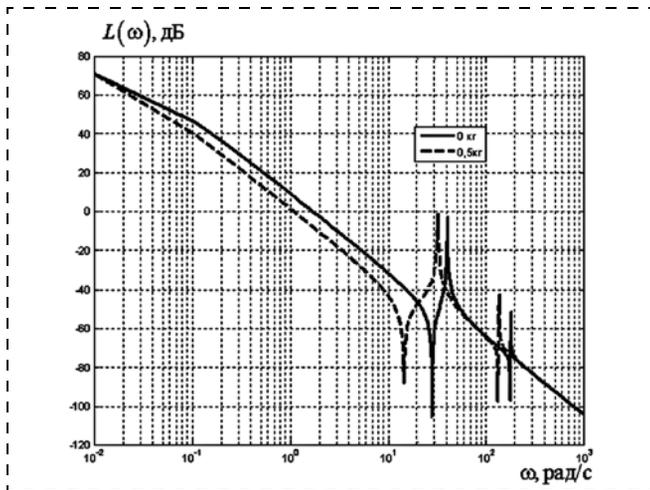


Рис. 4. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики ГОЗМ при предельных нагрузках: канал  $W_{\tau \rightarrow \theta_c}(s)$

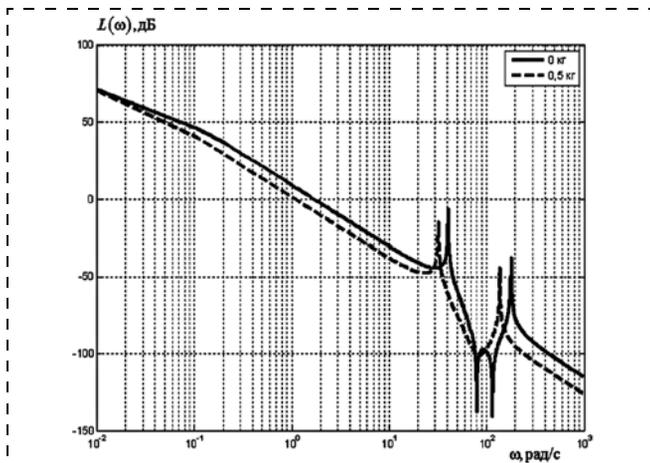


Рис. 5. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики ГОЗМ при предельных нагрузках  $m_L$ : канал  $W_{\tau \rightarrow \theta_t}(s)$

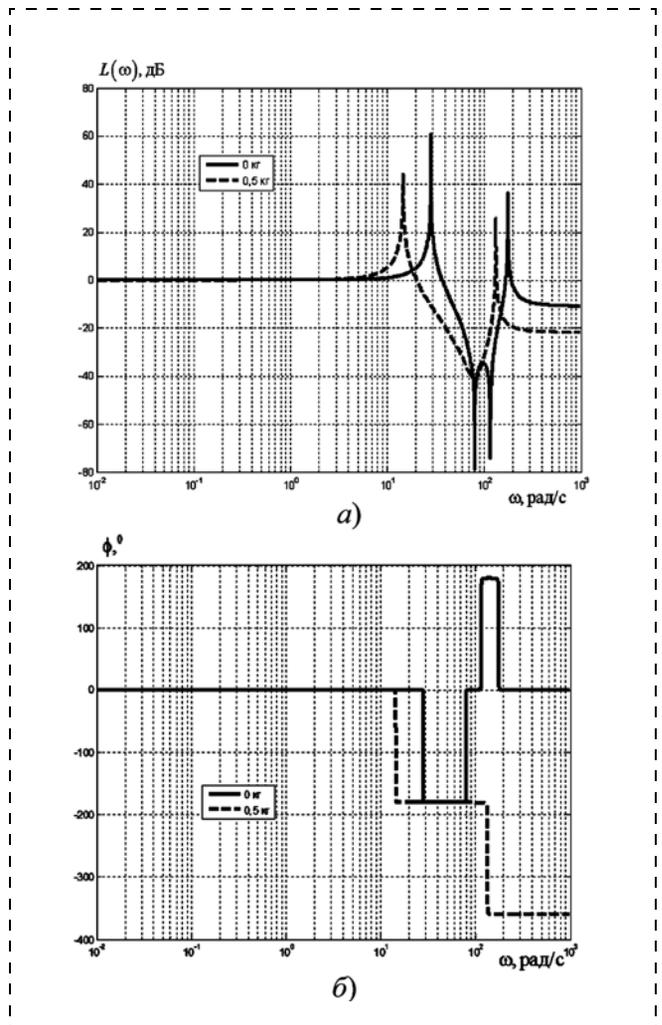


Рис. 6. Логарифмические частотные характеристики ГОЗМ (канал  $W_{\theta_c \rightarrow \theta_t}(s)$ ) при предельных нагрузках  $m_L$ : а – ЛАЧХ; б – ЛФЧХ

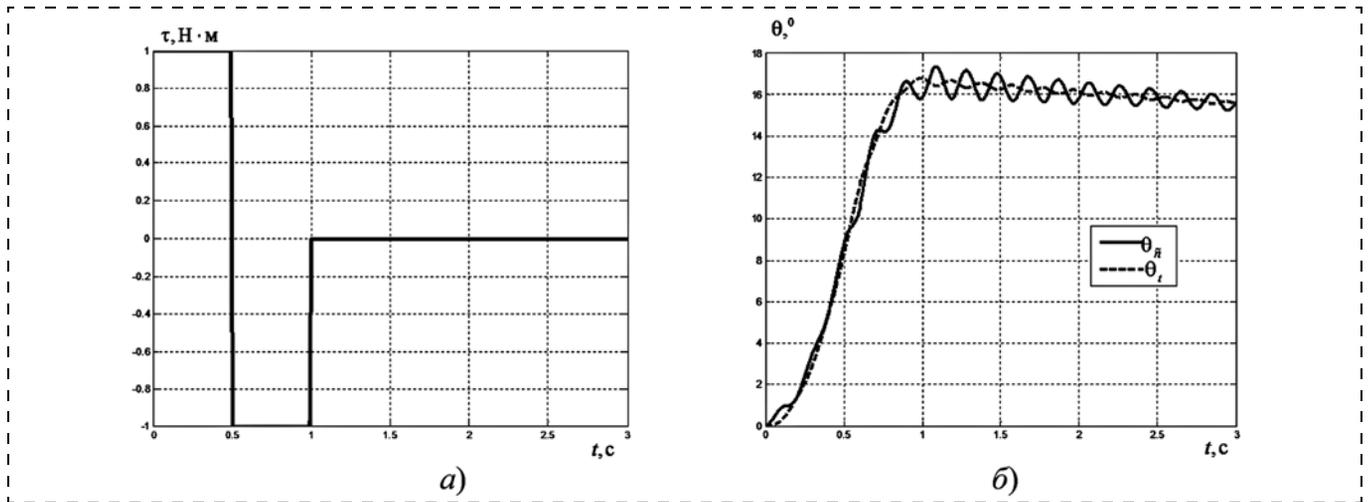


Рис. 7. Реакции измеряемой и регулируемой переменных на входной тестовый сигнал при нагрузке  $m_L = 0,5$  кг: а — тестовый сигнал; б — реакции

### Синтез регулятора

Из полученных выше частотных характеристик нетрудно заметить, что если синтезировать регулятор по измеряемой переменной  $y(t) = \theta_c(t)$ , обеспечивающий замкнутой системе управления ГОЗМ коэффициент усиления, равный единице в диапазоне частот  $\omega \in [0; 5]$  рад/с с близким к нулю фазовым сдвигом по обоим каналам, и подавать на вход желаемую траекторию перехода по углу  $\theta_c^*(t)$  с динамикой, укладывающейся в данный частотный диапазон, мы получим практически идеальное слежение по обоим каналам при полном отсутствии перерегулирования.

Ясно, что для того чтобы увеличить запас устойчивости по фазе (без регулятора он составляет приблизительно  $2,5^\circ$ ), необходим либо ПД регулятор, либо регулятор с близкой к нему структурой. К тому же, для повышения быстродействия (частота среза без регулятора составляет около 1 рад/с) требуется увеличить статический коэффициент усиления. Используем регулятор с опережением по фазе [10], имеющий следующую структуру:

$$W_p(s) = \frac{K_p(s/\omega_0 + 1)}{s/\omega_p + 1}, \quad (15)$$

где  $\omega_0 \ll \omega_p$ . Нетрудно заметить, что при  $\omega_p \rightarrow \infty$  регулятор с опережением по фазе переходит в обычный ПД регулятор. Но мы выбираем регулятор с опережением по фазе, так как он позволяет не только синтезировать физически реализуемый регулятор, но и снизить влияние высокочастотных шумов за счет конечной частоты  $\omega_p$ . Структура системы управления ГОЗМ для перевода из одного состояния покоя в другое состояние покоя имеет вид, показанный на рис. 8.

Для рассчитанных параметров регулятора  $K_p = 15,95$ ;  $\omega_0 = 1,835$  рад/с;  $\omega_p = 67$  рад/с (с частотой среза около 10 рад/с и запасом по фазе около  $90^\circ$ )

получены частотные характеристики замкнутой системы при предельных нагрузках 0 и 0,5 кг (рис. 9, 10).

В частотном диапазоне  $[0,5]$  рад/с максимальные отклонения логарифмических частотных характеристик по каналам  $\theta^* \rightarrow \theta_c$ ;  $\theta^* \rightarrow \theta_t$  от идеальных частотных характеристик  $L(\omega) = 0$  дБ,  $\phi(\omega) = 0^\circ$  при предельных нагрузках ГОЗМ представлены в табл. 3.

Данный диапазон используем для выбора динамических характеристик входного задающего воздействия. Числовые значения, приведенные в табл. 3, и частотные характеристики замкнутой системы, показанные на рис. 9, 10, дают основания предположить, что сигнал желаемой траектории  $\theta^*(t)$  со спектром, расположенным в частотном диапазоне  $[0,5]$  рад/с, будет воспроизведен на выходе регулируемой и измеряемой переменных с необходимой точностью. Последующие результаты моделирования подтвердили это предположение. Остается сформировать такой сигнал.

### Формирование желаемой траектории перехода.

Для решения данной задачи рассмотрим выход  $Y_0(s)$  двойного интегратора

$$W(s) = \frac{K}{s^2},$$

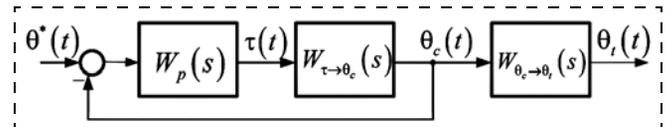


Рис. 8. Структурная схема системы управления ГОЗМ

Таблица 3

Максимальные отклонения частотных характеристик каналов  $\theta^* \rightarrow \theta_c$ ;  $\theta^* \rightarrow \theta_t$  от идеальных в диапазоне  $[0,5]$  рад/с

Нагрузка $m_L$ , кг	$L(\omega)$ , дБ	$\phi(\omega)$ , $^\circ$
0	0,53	-10
0,5	1,96	-31

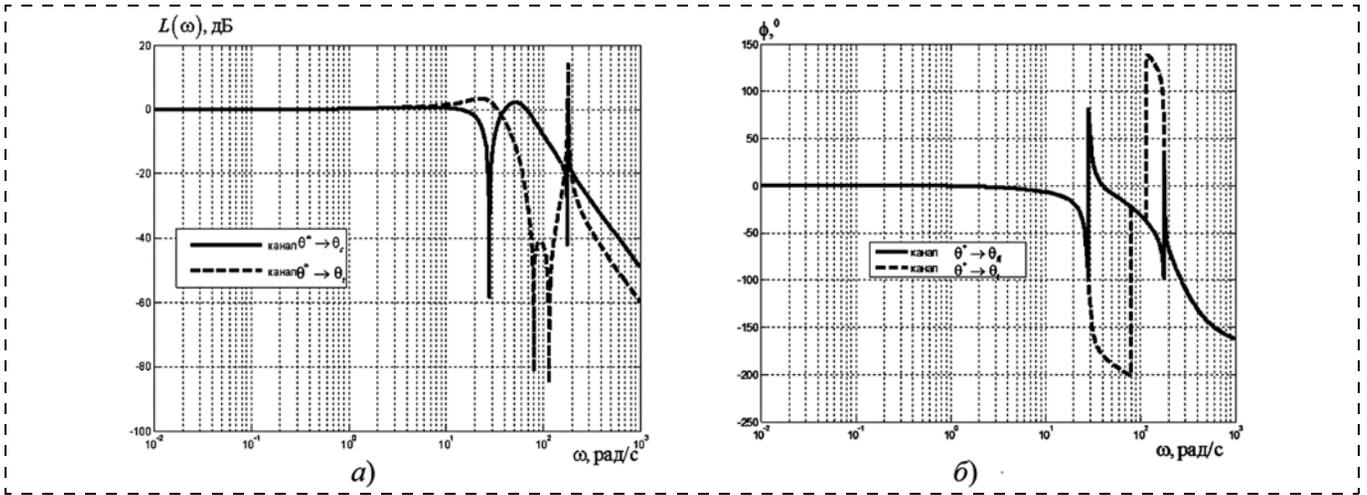


Рис. 9. Логарифмические частотные характеристики системы управления ГОЗМ:  
 а – ЛАЧХ; б – ЛФЧХ;  $m_L = 0$  кг

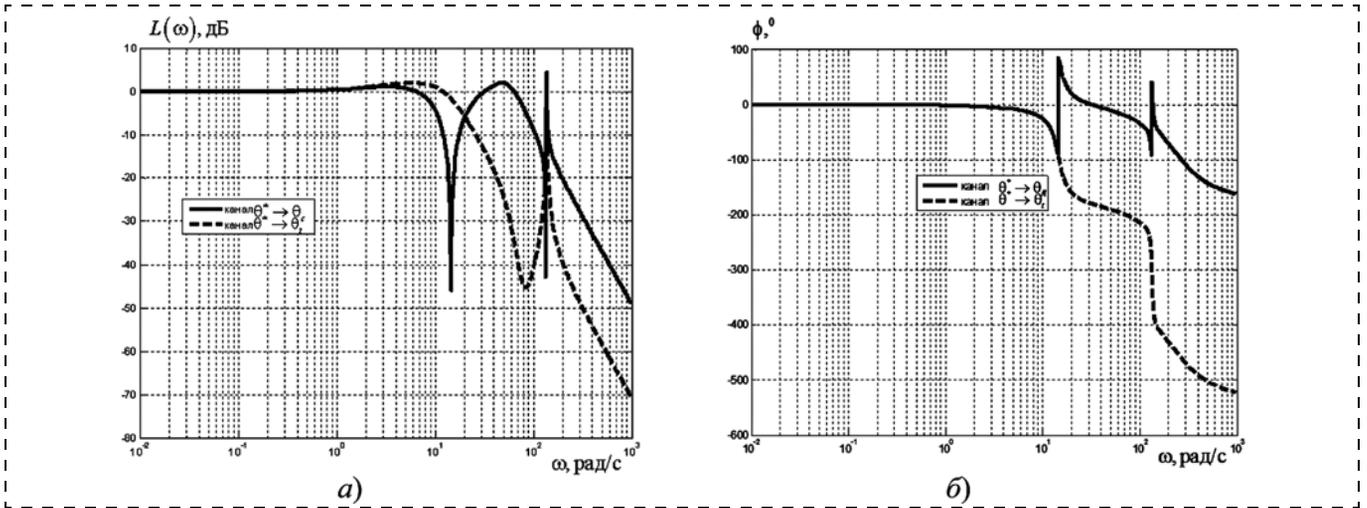


Рис. 10. Логарифмические частотные характеристики системы управления ГОЗМ:  
 а – ЛАЧХ; б – ЛФЧХ;  $m_L = 0,5$  кг

на вход которого подана синусоида частоты  $\beta$

$$U(s) = \frac{\beta}{s^2 + \beta^2}.$$

В этом случае выходной сигнал во временной области при нулевых начальных условиях имеет вид

$$y_0(t) = K \left( \frac{t}{\beta} - \frac{\sin(\beta t)}{\beta^2} \right). \quad (16)$$

Пусть  $t_1$  — желаемое время для перевода ГОЗМ из состояния покоя  $\theta^*(0) = 0$  рад в состояние покоя  $\theta^*(t_1) > 0$  рад. Определим частоту синусоиды

$$\beta = \frac{2\pi}{t_1}. \quad (17)$$

Найдем коэффициент

$$K = \frac{\beta \theta^*(t_1)}{t_1}. \quad (18)$$

Если подставить выражения (17), (18) в формулу (16), то получим

$$\begin{aligned} y_0(t_1) &= \theta^*(t_1), \quad y_0(t) = \theta^*(t), \quad t > t_1; \\ \dot{y}_0(t_1) &= \dot{\theta}^*(t_1) = 0, \quad \dot{y}_0(t) = 0, \quad t > t_1. \end{aligned} \quad (19)$$

Формулы (16)–(19) определяют желаемую траекторию  $\theta^*(t)$  углового движения манипулятора. Условие хорошего качества перевода: частота синусоиды  $\beta \in [0,5]$  рад/с.

Пусть при повороте на максимальный угол  $\theta_{\max}^* = \max \theta^*(t_1) = \pi$  (рад) время перевода  $t_1(\pi) = 3$  с. При повороте на меньшие углы заданное время перевода можно уменьшать (но не по линейному закону, иначе можно выйти за допустимый частотный диапазон  $\beta \in [0,5]$  рад/с). Предложен экспоненциальный закон изменения конечного времени

$$t_1(\theta^*(t_1)) = t_1(\pi) e^{\alpha(\theta^*(t_1) - \pi)} = 3e^{\alpha(\theta^*(t_1) - \pi)}, \quad (20)$$

где  $\pi/20 < \theta^*(t_1) \leq \pi$  (рад) — желаемый угол перевода,

$$\alpha = \frac{\ln(t_1^{\min}/t_1(\pi))}{\theta_{\min}^* - \pi} = 0,171. \quad (21)$$

В формуле (21) принято  $\theta_{\min}^* = \frac{\pi}{20}$ ,  $t_1^{\min} = 1,8$  с.

### Результаты моделирования

Проведено моделирование с различными нагрузками и на различные углы поворота.

1. ГОЗМ без нагрузки  $\theta^*(t_1) = \frac{\pi}{20}$  рад =  $9^\circ$  (рис. 11).

Числовые значения параметров и конечные результаты:

$$\theta_c(t_1^s) = 9,02^\circ; \theta_r(t_1^s) = 9,02^\circ;$$

$$\beta = 3,49 \text{ рад/с}; t_1 = 1,8 \text{ с}; t_1^s = 2 \text{ с},$$

где  $t_1^s$  — характеризует общее время перехода, а время  $t_1$  — гарантированное время попадания в 5 %-ную трубку.

2. ГОЗМ с нагрузкой  $m_L = 0,5$  кг;

$$\theta^*(t_1) = \frac{\pi}{6} \text{ рад} = 30^\circ \text{ (рис. 12).}$$

Числовые значения параметров и конечные результаты:

$$\theta_c(t_1^s) = 30,11^\circ; \theta_r(t_1^s) = 30,11^\circ;$$

$$\beta = 3,27 \text{ рад/с}; t_1 = 2,1 \text{ с}; t_1^s = 2,5 \text{ с}.$$

3. ГОЗМ с нагрузкой  $m_L = 0,3$  кг;  $\theta^*(t_1) = \pi$  (рад) =  $180^\circ$  (рис. 13).

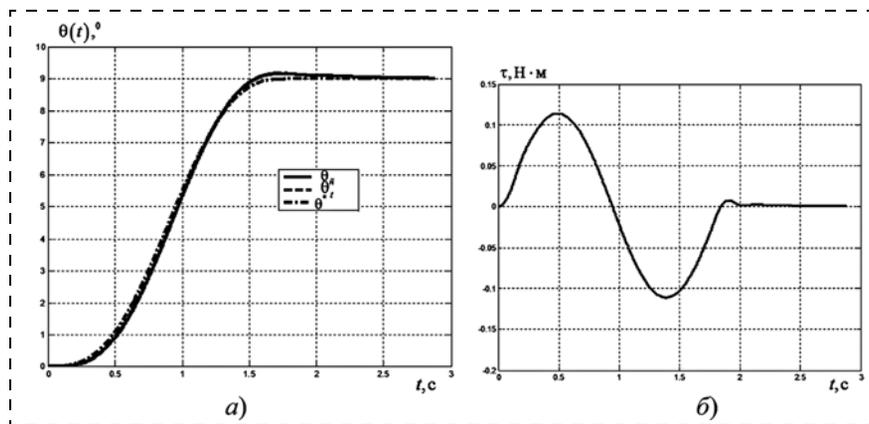
Числовые значения параметров и конечные результаты:

$$\theta^c(t_1^s) = 180,01^\circ; \theta_r(t_1^s) = 180,07^\circ;$$

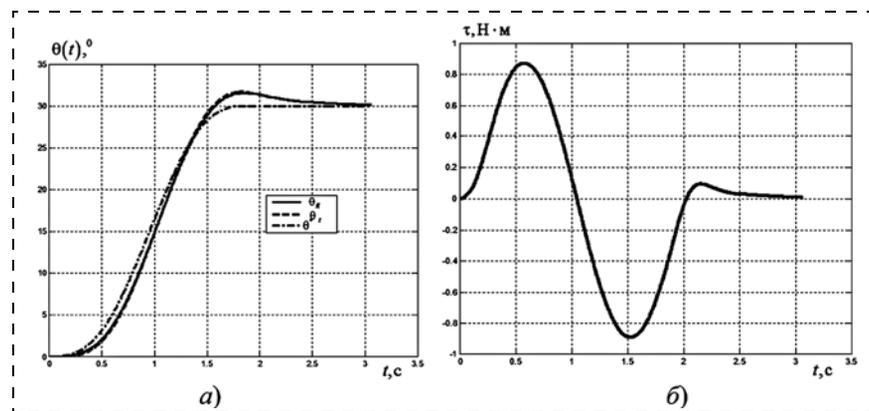
$$\beta = 3,1416 \text{ рад/с}; t_1 = 3 \text{ с}; t_1^s = 3,5 \text{ с}.$$

Выводы по результатам моделирования:

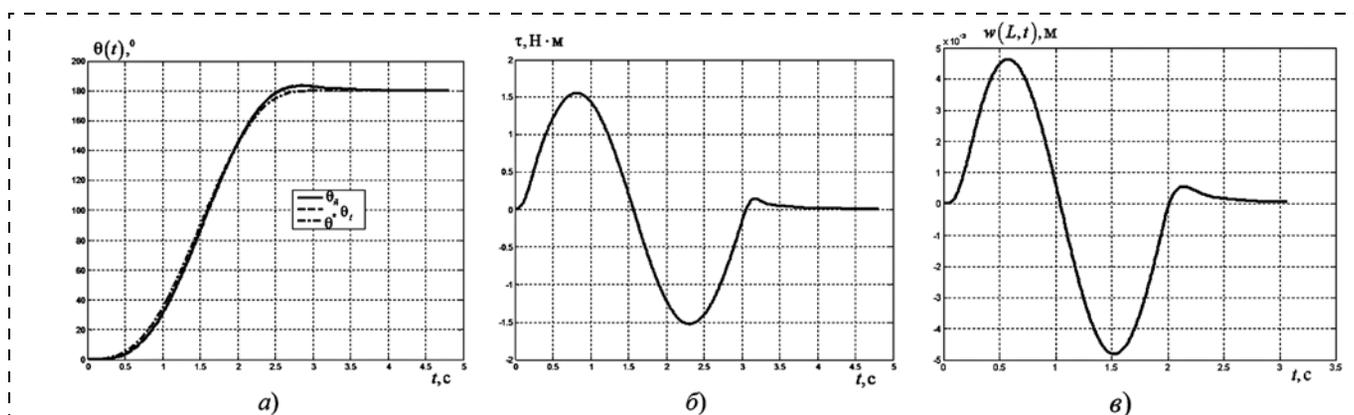
1. При одной и той же нагрузке с увеличением времени перехода  $t_1$  и при снижении частоты  $\beta$  улучшается точность перевода и уменьшается максимальная амплитуда управления.



**Рис. 11. Графики:**  
а — углового движения; б — управляющего момента для ГОЗМ без нагрузки,  $m_L = 0$  кг и  $\theta^*(t_1) = \frac{\pi}{20}$  рад =  $9^\circ$



**Рис. 12. Графики:**  
а — углового движения; б — управляющего момента для ГОЗМ с нагрузкой  $m_L = 0,5$  кг;  $\theta^*(t_1) = \frac{\pi}{6}$  рад =  $30^\circ$



**Рис. 13. Графики:**  
а — углового движения; б — управляющего момента; в — упругих деформаций схвата для ГОЗМ с нагрузкой  $m_L = 0,3$  кг;  $\theta^*(t_1) = \pi$  (рад) =  $180^\circ$

2. При выбранных параметрах регулятора и времени перехода во всем диапазоне нагрузок и углов поворота обеспечивается высокая точность углового перевода схвата (погрешность не более  $0,12^\circ$ ).

3. Максимальные упругие деформации схвата  $w_{\max}(L, t) = 10,9$  мм имеют место при максимальной нагрузке  $0,5$  кг и максимальном угле перехода  $180^\circ$ .

### Заключение

В статье предложен алгоритм синтеза простого робастного (по отношению к неизвестной нагрузке схвата) регулятора для углового финитного управления гибкого однозвенного манипулятора из одного состояния покоя в другое за заданное время. Регулятор с опережением по фазе имеет первый порядок, обеспечивает хороший запас по фазе и амплитуде, а для выработки управляющего воздействия необходим только один датчик измерения углового положения привода. Хорошее качество управления обеспечивается специально подобранным входным задающим воздействием.

### Список литературы

1. Singer N. G., Seering W. P. Preshaping command inputs to reduce system vibration // ASME J. of Dynamic Systems, Measurements and Control. 1990. Vol. 112. P. 76–112.
2. Hyde J. M., Seering W. P. Using input command pre-shaping to suppress multiple mode vibration // Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1991. P. 2604–2609.
3. Kwon D. S., Book W. J. An inverse dynamic method yielding flexible manipulator state trajectories // Proc. of American Control Conf. 1990. P. 186–193.
4. De Luca A., Di Giovanni G. Rest-to-rest motion of a one-link flexible forearm // Proc. of IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics. 2001. P. 923–928.
5. De Luca A., Caiano V., Del Vecovo D. Experiments on rest-to-rest motion of a flexible arm // Robotics VIII, Springer Tracts in Advanced Robotics / B. Siciliano, P. Dario (Eds.). Berlin: Springer Verlag, 2003. Vol. 5. P. 338–349.
6. Integral Resonant Control for Vibration Damping and Precise Tip-Positioning of a Single-Link Flexible Manipulator / Pereira E., Aphale S. S., Feliu V. // IEEE/ASME Trans. on Mechatronics. 2011. Vol. 16, N. 2. P. 232–240.
7. Gu D.-W., Petkov P. Hr., Konstantinov M. Robust Control Design with Matlab. London: Springer Verlag, 2005. 389 p.
8. Краснощеченко В. И. Разработка и исследование математической модели гибкого однозвенного манипулятора с использованием принципа наименьшего действия Гамильтона // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 6. С. 383–390.
9. Любошиц М. И., Ицкович Г. М. Справочник по сопротивлению материалов. Минск: Вышэйшая школа, 1969. 464 с.
10. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. 832 с.

## Synthesis of a Simple Robust Regulator for the Rest-to-Rest Motion Control of a Flexible Single-link Manipulator

V. I. Krasnoshchechenko, kviiip@yandex.ru✉,

Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, 248600, Russian Federation

Corresponding author: Krasnoshchechenko Vladimir I., Ph. D., Senior Lecturer, Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, 248600, Russian Federation, e-mail: kviiip@yandex.ru

Received on March 14, 2017

Accepted on April 07, 2017

*The topic of the article is the problem of control of the motion of a flexible single-link manipulator from one state of rest into another in a given time. Having a number of advantages in comparison with the absolutely rigid parts of the manipulators, the flexible manipulators are more difficult in control because of a higher order of the system and nonminimum phase dynamics, which exist between the tip position and the input torque applied at the joint of the actuator. During the synthesis of the control system various approaches are used: 1) formation of the necessary input signals; 2) synthesis of a regulator with the use of the inverse dynamics; 3) the algorithms, which ensure reduction of the level of the resonant frequencies of the flexible manipulator due to regulation of the coupling torque of a link at the base of the beam 4)  $H_\infty$  control. In the control loop not less than two sensors and one or two regulators related to the high order were established. The given work proposes to generate the input signal of a special kind with a low-frequency spectrum, ensuring practical absence of vibrations of the tip, smoothness and accuracy of the link motion in all the range of the payloads at the tip. Furthermore, a simple regulator of the first order with a signal of a feedback only on the angle hub of the actuator is synthesized. The offered control algorithm was tested on a concrete example for the flexible single-link manipulator with the following characteristics: length — 1m; width — 0,0055 m; height — 0,05 m; material — aluminum; range of the angular turns — [9, 180] degrees; range of the mass payloads — [0, 0,5] kg; time of motion — [1,8, 3] seconds; overshoot — not more than 10 %. Analysis of the frequency and dynamic characteristics of the flexible manipulator was carried out. Then in the mathematical model of the manipulator the first two flexible forms were left. The input for the manipulator was the hub torque. The results of modeling for various angle turns and payloads of the tip confirm the efficiency of the offered control algorithm.*

**Keywords:** flexible manipulator, regulator, synthesis, robust control, assumed modes method

For citation:

Krasnoshchechenko V. I. Synthesis of a Simple Robust Regulator for the Rest-to-Rest Motion Control of a Flexible Single-link Manipulator, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 651–660.

DOI: 10.17587/mau.18.651-660

### References

1. Singer N. G., Seering W. P. Preshaping command inputs to reduce system vibration, *ASME J. of Dynamic Systems, Measurements and Control*, 1990, vol. 112, pp. 76–112.
2. Hyde J. M., Seering W. P. Using input command pre-shaping to suppress multiple mode vibration, *In Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1991, pp. 2604–2609.

3. **Kwon D. S., Book W. J.** An inverse dynamic method yielding flexible manipulator state trajectories, *In Proceedings of American Control Conf.*, 1990, pp. 186–193.

4. **De Luca A., Di Giovanni G.** Rest-to-rest motion of a one-link flexible forearm, *In Proceedings of IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2001, pp. 923–928.

5. **De Luca A., Caiano V., Del Vecovo D.** Experiments on rest-to-rest motion of a flexible arm, *In Robotics VIII, Springer Tracts in Advanced Robotics*, B. Siciliano, P. Dario (Eds.), Berlin, Springer Verlag, 2003, vol. 5, pp. 338–349.

6. **Pereira E., Aphale S. S., Feliu V.** Integral Resonant Control for Vibration Damping and Precise Tip-Positioning of a Single-Link Flexible Manipulator, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, 2011, vol. 16, no. 2, pp. 232–240.

7. **Gu D.-W., Petkov P. Hr., Konstantinov M.** Robust Control Design with Matlab, London, Springer Verlag, 2005, 389 p.

8. **Krasnoshchechenko V. I.** *Razrabotka i issledovanie matematicheskoy modeli gibkogo odnozyennogo manipulyatora s ispol'zovaniem principa naimen'shego dejstvija Gamil'tona* (Development and investigation of mathematical model of a flexible single-link manipulator by using of the Hamilton's principle), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 6, pp. 383–390 (in Russian).

9. **Lyuboshic M. I., Ickovich G. M.** *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* (Handbook on strength of materials), Minsk, Vyshehshaya shkola, 1969, 464 p. (in Russian).

10. **Dorf R. C., Bishop R. H.** Modern Control Systems. Ninth Edition, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2001, 822 p.

УДК 621.0:004.82

DOI: 10.17587/mau.18.660-664

**А. Г. Лютов**, д-р техн. наук, проф., lutov1@mail.ru,  
**Ю. В. Рябов**, канд. техн. наук, доц., ryabov\_yuri\_atp@mail.ru,  
Уфимский государственный авиационный технический университет

## Синтез технологического процесса для роботизированного комплекса на основе знаний

*Рассмотрен новый подход к синтезу технологических операций на основе последовательных цепочек знаний переходов, выполняемых роботизированным комплексом. Гибкость процесса технологической подготовки для роботизированного комплекса достигается выбором наилучшего решения, удовлетворяющего требованиям текущей производственной ситуации. Предложен новый метод представления знаний на основе XML-схем, базирующийся на создании элементов знаний для технологических объектов и переходов.*

**Ключевые слова:** робототехнологический комплекс, структурный синтез, технологический процесс, элементы знаний, цепочки исполняемых переходов

### Введение

Использование робототехнологических комплексов (РТК) позволяет изготавливать детали в любом порядке и варьировать их выпуск в зависимости от производственной программы, сокращает затраты и время на подготовку производства, повышает коэффициент использования оборудования.

Опыт эксплуатации промышленных роботов в различных производственных условиях позволил определить основные особенности и принципы построения технологических процессов в случае автоматизации отдельных операций с помощью промышленных роботов. При этом надо учитывать особенности их применения как при обслуживании технологического оборудования, так и при использовании робота в качестве технологического оборудования при выполнении процессов сварки, окраски, сборки, зачистки облоя и т. п.

Проектирование технологического процесса (ТП) РТК можно разделить на четыре уровня [1]:

- принципиальная схема процесса;
- маршрут обработки деталей;
- операционная технология;
- управляющие программы.

Первому уровню свойственны наибольшая степень абстракции и определение только принципиальных особенностей структуры и функции ТП. От

уровня к уровню степень детализации проектных решений возрастает.

Задачи автоматизированного проектирования ТП можно эффективно решать методом синтеза проектных решений. Процесс формирования технологического процесса представляет собой совокупность процедур структурного и параметрического синтеза. Структурный синтез реализуется на уровнях формирования операций и переходов, а параметрический — на уровне выбора базы, определения межпереходных размеров, расчета режимов обработки и т. д. [1].

В данной работе рассматривается синтез ТП РТК с применением знаний технологических переходов. Знания включают навыки и опыт технологов и операторов, участвующих в различных ТП изготовления изделий, и представлены в виде элементов знаний.

### Предлагаемый подход

Для формирования ТП РТК предлагается метод структурного синтеза технологических операций на основе последовательных цепочек знаний переходов.

Синтез исполнительных переходов по обработке и сборке изделия — это последовательность методов обработки, необходимых для достижения требуемых атрибутов, определенных чертежом изделия. Такими атрибутами являются:

- геометрический тип поверхности;

- точность размера;
- шероховатость;
- вид термообработки и т. д.

Формирование последовательности операций выполняется путем выявления признаков технологической совместимости и преемственности. Две операции попарно совместимы, если состояние детали на выходе одной операции может быть исходным для другой операции.

Синтез структуры операций необходим для создания цепочки исполняемых переходов (рис. 1), последовательность которых определяет целостность операции, выполняемой на выбранном оборудовании.

Метод структурного синтеза предусматривает формирование различных цепочек исполняемых переходов (ЦИП) технологической операции на основе элементов знаний и в соответствии с условиями ТП РТК.

Для технологической операции, не говоря уже о ТП в целом, характерна многовариантность, которая предполагает выбор наилучшего решения, удовлетворяющего требованиям текущей производственной ситуации. В итоге необходима гибкость технологической подготовки, достигаемая методом синтеза технологических операций в виде цепочки исполняемых переходов, которые предлагается представлять в виде элементов знаний (ЭЗ).

Для решения данной задачи предложен новый метод представления знаний на основе XML-схем. Предложено разбивать знания на элементы с дальнейшим гибким формированием цепочек знаний.

Элементы знаний создаются как для технологических объектов и деталей, так и для технологических переходов (рис. 1). Последние определяют отношение между объектами.

Вновь созданные ЦИП помещаются в базу знаний для длительного хранения. В дальнейшем их можно использовать для моделирования ТП РТК и выполнять их редактирование. В настоящее время можно проводить моделирование таких процессов, как литье, штамповка, механообработка, сварка и термообработка.

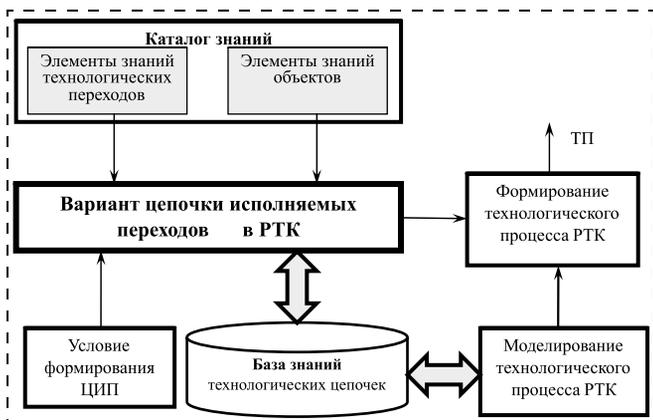


Рис. 1. Синтез технологического процесса РТК с применением знаний

Эффективно можно моделировать процесс штамповки, когда программный комплекс (например, DEFORM) имеет виртуальные штампы, прессы и печи, входящие в РТК. При этом осуществляется моделирование сложных трехмерных процессов пластического деформирования металлов [2]. При моделировании литейных процессов используются такие специальные программные средства, как SOLIDCast или WinCast. Технолог наблюдает процесс кристаллизации отливки до начала производства и анализирует различные варианты ТП литья [3].

Моделирование ТП механообработки можно проводить в САМ-системе, позволяющей выполнять анимацию съема металла различным режущим инструментом и показывать возможные столкновения инструмента с объектами станка и приспособлениями [4]. Моделирование РТК механообработки стало возможным в связи с применением трехмерных моделей промышленных роботов, металлорежущего станка, инструмента и применяемого зажимного приспособления. Технолог может моделировать процесс обработки детали на любом станке, предварительно созданном на основе его кинематической схемы и твердотельной модели. Данные возможных ЦИП можно брать из базы знаний (рис. 1) для создания различных вариантов моделируемой обработки [5]. Обмен данными между САМ-системой и базой знаний можно осуществлять с помощью технологии XML [6].

Моделирование сборочных процессов, выполняемых РТК, можно проводить с помощью САД-системы. Данные сборочных переходов также можно брать из базы знаний для реализации различных вариантов сопряжений деталей сборочного процесса.

Элементы знаний технологических объектов определяются основными характеристиками технологического оборудования, инструмента, оснастки (приспособления, штампы, пресс-формы, литейные формы), промышленных роботов, накопителей деталей, приспособлений для крепления и перемещения деталей в РТК и т. д.

Характеристики следует описывать такие, которые необходимы для разработки ТП РТК. Например, для РТК механообработки описание металлорежущего станка с числовым программным управлением должно включать в себя такие характеристики, как выполняемые операции, число управляемых координат, класс точности, диапазон скоростей главного движения, диапазон подач, размеры рабочей зоны.

Описание промышленного робота включает такие основные характеристики, как число степеней подвижности, грузоподъемность, зона обслуживания, габаритные размеры, погрешность позиционирования. Кроме того, указываются характеристики манипулятора, приводов, системы управления, информационной системы.

Элементы знаний технологических переходов определяют технологические действия, связанные с обработкой элементарных поверхностей детали или связанные с выполнением вспомогательных пере-

ходов. В качестве примера рабочими переходами в РТК механообработки могут быть следующие:

- подрезать торец;
- точить поверхность, выдерживая определенный размер;
- обрабатывать канавку;
- сверлить отверстие;
- фрезеровать поверхности, выдерживая определенные размеры.

Рабочие переходы имеют такие свойства (атрибуты), как номер перехода, скорость главного движения, величина подачи, время перехода, вид обрабатываемой поверхности. При описании перехода необходимо указывать обрабатываемые поверхности, материал детали и способ выполнения перехода.

Вспомогательные переходы определяют такие операции, как установка и снятие детали, выверка и закрепление детали, переустановка детали. В ТП РТК создаются элементы знаний, описывающие перемещение детали в зону захвата роботом, манипулирование деталью роботом в рабочей зоне технологического оборудования и манипулирование деталью роботом после ее обработки при перемещении в накопитель.

Использование РТК в машиностроении накладывает свой отпечаток на создание операционного ТП на основе исполняемых переходов, формируемых из ЭЗ. В тех РТК, где промышленные роботы играют роль вспомогательного устройства, операционная технология дополняется только вспомогательными переходами, связанными с подачей заготовки в зону захвата накопителя, установкой и снятием детали в рабочей зоне. Кроме того, добавляются ЭЗ, которые включают основные характеристики следующих технологических объектов:

- промышленных роботов;
- накопителей заготовок;
- накопителей готовых деталей;
- захватных устройств робота;
- накопителей инструментов.

В том случае, когда промышленный робот выполняет роль технологического оборудования, знания об исполняемых переходах создаются для технологических действий, выполняемых роботом. К таким относятся технологические операции сварки, сборки, термической обработки, шлифования, нанесения покрытий, зачистки, контроля и т. п.

### Метод представления знаний

Описание ЭЗ предлагается выполнять на языке XSD, так как XML-схемы содержат метаданные и с их помощью можно создавать базу знаний [7]. Ниже приведен пример графического описания XML-схемы ЭЗ перехода "точить поверхность" со всеми необходимыми элементами и их атрибутами (рис. 2).

Главный элемент "точить\_поверхности" включает атрибуты, определяющие его свойства, и атрибуты входящих объектов: обрабатываемая деталь, металлорежущий станок, инструмент. Для всех атрибутов определены также типы данных.



Рис. 2. Элемент знаний перехода "точить поверхность"

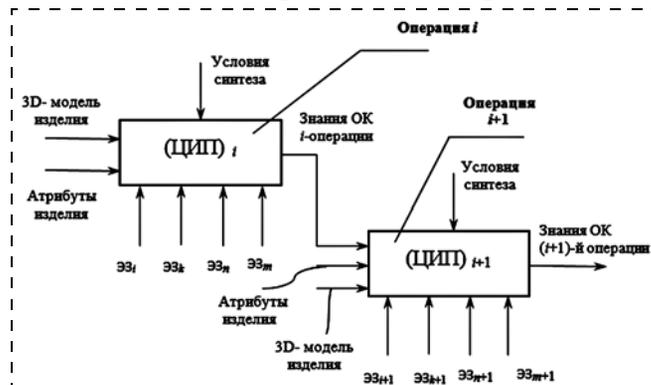


Рис. 3. Синтез структуры операций технологического процесса

Разработка операционной технологии в соответствии с требованиями текущей производственной ситуации выполняется поэтапно:

1. Синтез очередного варианта операции.
2. Анализ варианта.
3. Принятие решения о замене ранее выбранного варианта на новый вариант или о прекращении синтеза новых вариантов.

Синтез структуры операций ТП показан на рис. 3.

Формирование *i*-й операции с помощью цепочки исполнительных переходов (ЦИП)<sub>*i*</sub>, составленной из элементов знаний ЭЗ<sub>*j*</sub>, ЭЗ<sub>*к*</sub>, ЭЗ<sub>*п*</sub>, ЭЗ<sub>*м*</sub>, проводится на основе данных 3D-модели изделия и ее атрибутов. Вариант формирования очередной операции определяется соответствующим условием текущей производственной ситуации. Условие синтеза переходов на основе элементов знаний указывается сверху блока операции и является управляющим воздействием синтеза очередной операции. На выходе блока операции формируются знания для *i*-й операции.

Условие синтеза исполнительных переходов осуществляется не только за счет влияния атрибутов чертежа изделия и визуализации 3D-модели, но и таких атрибутов, как:

- максимальное значение припуска, определяющее тип перехода (черновой, получистовой или чистовой);
- марка обрабатываемого материала;
- марка материала инструмента;
- класс точности станка;
- необходимое число одновременно управляемых координат движения инструмента.

Число возможных вариантов ЦИП для конкретной операции может быть достаточно велико. На предприятии оно ограничивается возможностями существующего оборудования и применяемого инструмента. Это сокращает число альтернативных ЦИП, но проблема синтеза конкретной ЦИП для обработки поверхностей детали остается.

### Заключение

1. Для поиска наилучшего решения в построении ТП, удовлетворяющего требованиям текущей производственной ситуации, предложен метод структурного синтеза технологических операций на основе последовательных цепочек знаний переходов, выполняемых РТК.

2. Предложен новый метод представления знаний на основе XML-схем, основанный на представлении знаний в виде элементов технологических объектов и переходов.

3. Создание базы знаний позволяет сохранять проверенные варианты ТП после их моделирования в CAD/CAM-системах и повысить эффективность разработанного ТП с учетом моделирования и выбора наилучшего варианта цепочки исполняемых переходов в РТК.

4. Выбор последовательных цепочек рабочих и вспомогательных переходов позволит провести синтез управляющей программы работы РТК.

5. Для организации информационных потоков между различными программными средствами це-

лесообразно использовать технологию XML. Обмен информацией через XML-документы между программными средствами организуется с помощью SOAP-сообщений.

6. Предлагаемый подход к структурному синтезу ТП позволяет значительно сократить время на подготовку, генерацию и корректировку управляющих программ для РТК.

### Список литературы

1. САПР в технологии машиностроения / В. Г. Митрофанов, О. Н. Калачев, А. Г. Схиртладзе и др. Ярославль; Ярославский государственный технический университет, 1995. 298 с.
2. Сидоров А. А. Настоящее и будущее моделирования процессов обработки металлов давлением // САПР и графика. 2007. № 10. С. 78—79.
3. Вольнов И. Н. Системы автоматизированного моделирования литейных процессов — состояние, проблемы, перспективы // Литейщик России. 2007. № 6. С. 14—17.
4. Лютов А. Г., Рябов Ю. В., Полезин С. А. Повышение эффективности автоматизированного управления технологическими процессами производства авиационной техники на основе интеллектуальных технологий // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 3 (69). С. 1—4.
5. Лютов А. Г., Рябов Ю. В. Модель комплексного автоматизированного управления процессами в машиностроении // СТИН. 2016. № 5. С. 2—7.
6. Ryabov S. U., Lyutov A. G., Ryabov Yu. V., Vavilova A. V. Метод обмена информацией между программными системами автоматизации технологических и производственных процессов / Программные продукты и системы. 2016. № 4. С. 113—117.
7. W3C XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 1: Structures W3C Recommendation 5 April 2012. URL: <http://www.w3.org/TR/xmlschema11-1/>

## Synthesis of the Technological Process for a Robotic Complex on the Basis of Knowledge

A. G. Lutov, [lutov1@mail.ru](mailto:lutov1@mail.ru), Y. V. Ryabov, [ryabov\\_yuri\\_atp@mail.ru](mailto:ryabov_yuri_atp@mail.ru)  
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation

Corresponding author: Lutov Aleksey G., D. Sc., Professor,  
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation,  
e-mail: [klimina@imec.msu.ru](mailto:klimina@imec.msu.ru)

Received on March 20, 2017

Accepted on April 14, 2017

*A new approach to the synthesis of technological operations is based on the sequential combinations of the knowledge action actionaction, which are implemented by the robotic complex. Synthesis of the executive actions on processing and assembly of a product it is the sequence methods processing for achievement of the required attributes determined by the drawing of a product. The flexibility of the process for preparation of a robotic complex is achieved by selection of the best solutions, which meet the requirements of the current production situation. A new method of knowledge representation is based on XML schema for creation of the knowledge elements for the technological objects and actions. Creation of a knowledge base allows us to save the tested variants of the technological processes after their modeling in CAD/CAM systems and to improve their performance. Formation of  $i$  — operation by chaining the executive actions, is composed of the elements of knowledge of EK<sub>i</sub>, EK<sub>k</sub>, EK<sub>n</sub>, EK<sub>m</sub>, and is based on the data of the 3D model of the product and its attributes. The option of formation of the next operation is determined by the state of the current production situation. Condition of synthesis of the executive actions it is carried out due to influence of attributes of the drawing of a product and visualization 3D — models, also due to the following attributes: the maximal amount of the allowance; grade of the processed material; grade of the tool material; accuracy class of a machine; and necessity to use a number of simultaneously controllable axes of movement of a tool. Serial combinations of the working and auxiliary passages will make possible a synthesis of the control of the program of work of the robot technology complexes (RTC). The pro-posed approach to the structural synthesis of the technological process can significantly reduce the preparation time, generation and adjustment of the control programs for RTC.*

**Keywords:** robot technology complex, structural synthesis, technological process, elements of knowledge, chain of executable transitions

For citation:

**Lutov A. G., Ryabov Y. V.** Synthesis of the Technological Process for a Robotic Complex on the Basis of Knowledge, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 660–664.

DOI: 10.17587/mau.18.660-664

#### References

1. **Mitrofanov V. G., Kalachev O. N., Skhirtladze A. G.** CAD in engineering technology, Yaroslavl, Yaroslavl state technical University, 1995, 298 p. (in Russian).

2. **Sidorov A. A.** The Present and future of modeling of processes of processing of metals by pressure, *CAD and Graphics*, 2007, no. 10, pp. 78–79 (in Russian).

3. **Volnov I. N.** *Russian Foundryman*, 2007, no. 6, pp. 14–17 (in Russian).

4. **Liutov A. G., Ryabov Yu. V., Polesin S. A.** *Vestnik USATU*, 2015, vol. 19, no. 3 (69), pp. 1–4 (in Russian).

5. **Liutov A. G., Ryabov Yu. V.** Model of complex automated process control engineering, *STIN*, 2016, no. 5, pp. 2–7.

6. **Ryabov S. U., Liutov A. G., Ryabov Yu. V., Vavilova A. V.** The Method of information exchange between software systems of automation of technological and production processes, *Software Products and Systems*, 2016, no. 4, pp. 113–117.

7. **W3C XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 1: Structures** W3C Recommendation 5 April 2012, available at: URL: <http://www.w3.org/TR/xmlschema11-1/>

УДК 62-529

DOI: 10.17587/mau.18.664-669

**О. Н. Крахмалев**, канд. техн. наук, доц., olegkr64@mail.ru,

**Д. И. Петрешин**, д-р техн. наук, директор института, atsys@tu-bryansk.ru,

**Г. Н. Крахмалев**, аспирант, atsys@tu-bryansk.ru,

Брянский государственный технический университет

## Математические модели систем управления для калибровки ориентации инструмента промышленных роботов\*

*Рассмотрены математические модели систем управления промышленных роботов, позволяющие выполнить калибровку инструмента, закрепляемого на установочном фланце робота. Процедуры по калибровке выполняются при оснащении промышленного робота новым инструментом. Калибровка инструмента выполняется в два этапа. Первый этап состоит в определении точки центра инструмента (ТСП — Tool Center Point). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в ТСП. Данная статья посвящена исследованию второго завершающего этапа калибровки инструмента.*

**Ключевые слова:** промышленные роботы, калибровка инструмента, математические модели, системы управления

### Введение

Комплекс мероприятий по оснащению робота новым инструментом предусматривает выполнение процедуры калибровки этого инструмента перед его использованием в работе. Это необходимо для того, чтобы система управления промышленного робота могла правильно выполнять перемещение инструмента в рабочем пространстве робота. Для этого математические модели, описывающие преобразования координат в данной модели робота, должны быть дополнены математической моделью, сформированной для установленного инструмента. Математические модели, описывающие преобразования координат для инструмента, создаются системой управления автоматически при выполнении процедуры калибровки инструмента перед вводом нового инструмента в эксплуатацию. Созданные математические модели сохраняются в постоянной

памяти контроллера системы управления в библиотеке инструмента с указанием логического имени, присвоенного данному инструменту. В последующем при программировании движения промышленного робота в системе управления задается устанавливаемый на роботе инструмент путем присвоения специальному параметру логического имени выбранного инструмента.

Процедура калибровки инструмента выполняется в два этапа. Первый этап состоит в определении точки центра инструмента (ТСП — Tool Center Point). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в ТСП. Данная статья посвящена исследованию второго завершающего этапа калибровки инструмента, а именно разработке математических моделей систем управления промышленных роботов, предназначенных для калибровки нового инструмента.

Промышленные роботы представляют собой многозвенные механические системы с последовательной структурой, звенья которых образуют друг с другом кинематические пары пятого класса и моделируются твердыми телами. Такие многозвен-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Брянского ГТУ в рамках внутреннего гранта № 135 за 2016 г., выделенного на разработку программно-математического обеспечения для моделирования и управления промышленными роботами и многокоординатными станками по программе развития научного направления "Мехатроника и робототехника".

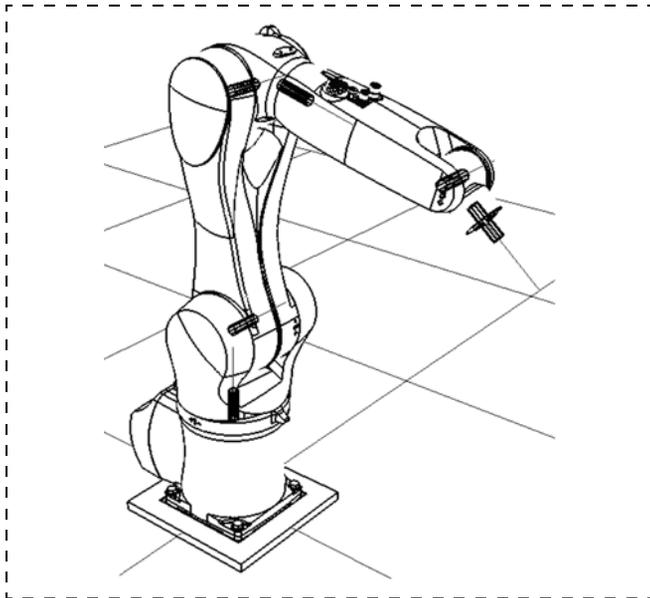


Рис. 1. Манипуляционная система промышленного робота KUKA KR6 AGILUS

ные механические системы называют манипуляционными системами. Пример манипуляционной системы промышленного робота KUKA KR6 AGILUS, имеющего шесть степеней подвижности, представлен на рис. 1, где изображены контуры звеньев робота и шарниры с указанием осей относительного вращения соединяемых ими звеньев. К последнему звену манипуляционной системы промышленного робота может быть жестко присоединен инструмент. Для этого в конструкции последнего звена предусматривается присоединительный фланец. На рис. 1 присоединительный фланец изображен в форме диска, внутри диска помещен шарнир, ось вращения которого перпендикулярна плоскости диска.

### Системы координат

Для описания относительного движения звеньев манипуляционных систем используют математические модели, обеспечивающие преобразование координат между системами координат, связываемыми с каждым звеном, и системой координат, связываемой с неподвижным основанием. Существуют разные методы задания связанных со звеньями систем координат и построения математических моделей, обеспечивающих преобразования координат между ними, например, метод Денавита — Хартенберга [1–4] или метод двух связываемых с каждым звеном систем координат [5]. Не вникая в отличительные особенности предложенных методов, достаточно отметить, что оба эти метода сводятся к составлению матриц, обеспечивающих преобразования однородных координат вида

$$A_{0,k} = A_0, 1A_{1,2}\dots A_{i-1,i}\dots A_{k-1,k}, k = \prod_{i=1}^k A_{i-1,i}, i, k = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где  $A_{i-1,i}$ ,  $i$  — матрица размерности  $4 \times 4$ , выполняющая преобразование однородных координат из системы  $S_i$ , связанной с  $i$ -м звеном, в систему  $S_{i-1}$ , связанную с  $(i-1)$ -м звеном;  $A_{0,k}$  — матрица размерности  $4 \times 4$ , выполняющая преобразование однородных координат из системы  $S_k$ , связанной с  $k$ -м звеном, в систему  $S_0$ , связанную с неподвижным основанием;  $n$  — число звеньев в манипуляционной системе робота.

Структура матрицы преобразования однородных координат  $A_{0,k}$  имеет вид

$$A_{0,k} = \begin{bmatrix} 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ R_{0,k} & r_{0k}^{(0)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $R_{0,k}$  — матрица поворота, имеющая размерность  $3 \times 3$  и содержащая косинусы углов между соответствующими осями систем координат  $S_0$  и  $S_k$ ;  $r_{0k}^{(0)} = (x_{0k}^{(0)} \ y_{0k}^{(0)} \ z_{0k}^{(0)})$  — радиус-вектор точки  $0_k$ , являющейся началом системы  $S_k$ , проведенный из начала системы  $S_0$ .

Для произвольной точки  $M$ , выбранной на  $k$ -м звене, матрицы преобразования однородных координат (1) позволяют получить простую форму выражения, реализующего эти преобразования [1–6]:

$$r_M^{(0)} = A_{0,k} r_M^{(k)}, \quad (3)$$

где  $r_M^{(0)} = [x_M^{(0)} \ y_M^{(0)} \ z_M^{(0)} \ 1]^T$  — расширенный радиус-вектор точки  $M$  в неподвижной системе  $S_0$ ,  $r_M^{(k)} = [x_M^{(k)} \ y_M^{(k)} \ z_M^{(k)} \ 1]^T$  — расширенный радиус-вектор точки  $M$  в связанной системе  $S_k$ .

В системах управления промышленных роботов неподвижную систему координат  $S_0$  именуют

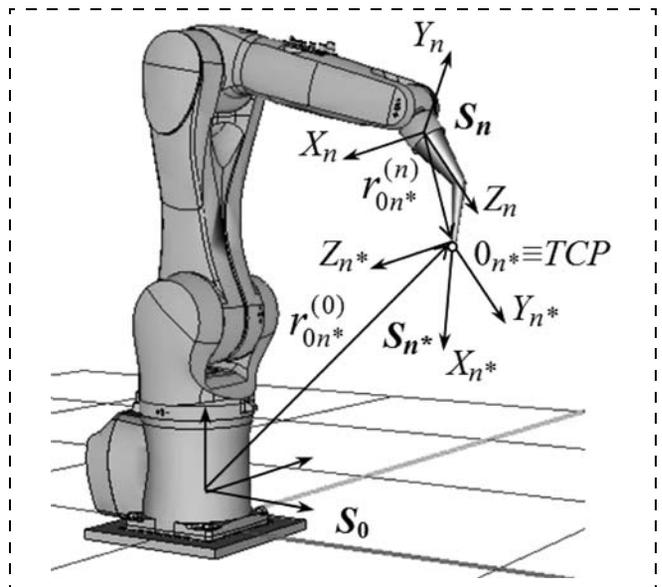


Рис. 2. Системы координат  $S_0 \equiv \text{WORLD}$ ,  $S_n \equiv \text{FLANGE}$ ,  $S_n^* \equiv \text{TOOL}$  и точка  $0_n^* \equiv \text{TCP}$

*WORLD* и называют мировой системой координат. Начало системы координат  $S_n$ , связанной с конечным звеном, помещают в центр установочного фланца, а ось  $Z_n$  этой системы координат направляют перпендикулярно плоскости фланца вдоль оси его вращения. Систему координат  $S_n$  именуют *FLANGE*. Точку центра инструмента обозначают  $O_{n*}$  и именуют *TCP*. Система координат  $S_{n*} \equiv TOOL$  с началом в точке  $O_{n*} \equiv TCP$  связывается с инструментом, присоединяемым к фланцу (рис. 2).

### Методы калибровки ориентации инструмента

При калибровке ориентации инструмента должна быть сформирована математическая модель, отражающая ориентацию системы координат *TOOL* по отношению к системе координат *FLANGE*. Сформированная математическая модель дополнит существующую в системе управления математическую модель, отражающую ориентацию системы координат *FLANGE* по отношению к системе координат *WORLD*.

На практике применяют несколько методов калибровки ориентации нового инструмента, основывающихся на данных предварительной калибровки его *TCP*.

### Метод параллельных осей

Оси системы координат  $S_{n*} \equiv TOOL$  направляются параллельно осям системы координат  $S_0 \equiv WORLD$ , при этом продольную ось инструмента  $X_{n*}$  направляют противоположно вертикальной оси  $Z_0$ , а оси  $Y_{n*}$  и  $Z_{n*}$  — по направлениям, совпадающим с осями  $Y_0$  и  $X_0$  соответственно.

Данному условию параллельности осей систем координат  $S_0$  и  $S_{n*}$  соответствует следующий вид матрицы поворота:

$$R_{0, n*} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Связь относительной ориентации осей систем координат  $S_0$ ,  $S_n$  и  $S_{n*}$  может быть описана уравнением

$$R_{0, n*} = R_{0, n} R_{n, n*}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) получаем искомое выражение

$$R_{n, n*} = R_{0, n}^{-1} R_{0, n*}. \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой математическую модель, позволяющую определить ориентацию системы координат  $S_{n*} \equiv TOOL$  относительно системы координат  $S_n \equiv FLANGE$  по методу параллельных осей.

### Метод калибровки ориентации инструмента по трем точкам

Использование данного метода предполагает, что предварительно выполнена калибровка точки

центра инструмента (*TCP*), которую принимают за начало системы координат *TOOL*, связываемой с калибруемым инструментом.

Калибруемый инструмент закрепляется на установочном фланце робота. В системе управления выбираются сохраненные при калибровке положение *TCP*, логическое имя инструмента и выполняются действия, реализующие данный метод.

Последовательность действий:

1. *TCP* калибруемого инструмента подводится к закрепленному в рабочем пространстве робота заостренному наконечнику. Сохраняются данные о положении робота.

2. *TCP* перемещается в положительном направлении вдоль продольной оси инструмента  $X_{n*}$  и фиксируется. Сохраняются данные о новом положении инструмента.

3. Калибруемый инструмент перемещается так, чтобы вершина заостренного наконечника оказалась в плоскости  $X_{n*}Y_{n*}$  в той части, которая соответствует положительному направлению оси  $Y_{n*}$ . Вычисляются и сохраняются данные об ориентации инструмента.

Математическая модель, отражающая ориентацию системы координат *TOOL* по отношению к системе координат *FLANGE*, может быть получена на основе выражения (3).

В соответствии с приведенной последовательностью действий, реализующей данный метод калибровки, при подводе *TCP* калибруемого инструмента к заостренному наконечнику для каждого шага этой последовательности будем выполнять следующие шаги.

• Шаг 1.

$$r_{\Delta}^{(0)} = {}^{(1)}A_{0, n} r_{0n*}^{(n)}, \quad (7)$$

где  $r_{\Delta}^{(0)}$  — радиус-вектор вершины заостренного наконечника, закрепленного в рабочем пространстве робота;  $r_{0n*}^{(n)} = [x_{0n*}^{(n)} \ y_{0n*}^{(n)} \ z_{0n*}^{(n)} \ 1]^T$  — радиус-вектор, содержащий координаты *TCP* калибруемого инструмента в системе координат  $S_n \equiv FLANGE$ .

• Шаг 2.

$$r_{\Delta}^{(0)} = {}^{(2)}A_{0, n} A_{n, n*} r_{\Delta x}^{(n*)}, \quad (8)$$

$$r_{\Delta x}^{(n*)} = [\Delta_1 \ 0 \ 0 \ 1]^T, \quad (9)$$

где  $\Delta_1$  — произвольное перемещение *TCP* в положительном направлении по оси  $X_{n*}$ ,  $\Delta_1 < 0$  (рис. 3).

Приравняв выражения (7) и (8), получим уравнение

$${}^{(1)}A_{0, n} r_{0n*}^{(n)} = {}^{(2)}A_{0, n} A_{n, n*} r_{\Delta x}^{(n*)}. \quad (10)$$

Преобразуем уравнение (10) к виду

$$A_{n, n*} r_{\Delta x}^{(n*)} = {}^{(2)}A_{0, n}^{-1} {}^{(1)}A_{0, n} r_{0n*}^{(0)} = V^{(1)}, \quad (11)$$

где  $V^{(1)} = [v_x^{(1)} \ v_y^{(1)} \ v_z^{(1)} \ 1]^T$  — вектор промежуточных вычислений.

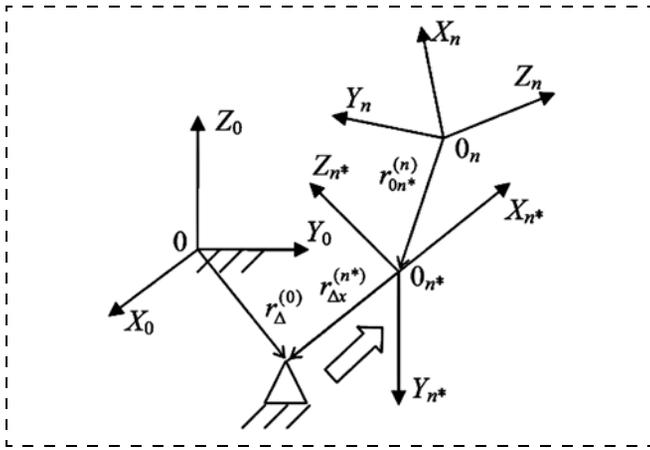


Рис. 3. Перемещение инструмента вдоль оси  $X_{n^*}$

Аналогично (2) структура матрицы преобразования однородных координат  $A_{n,n^*}$  имеет вид

$$A_{n,n^*}^{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ R_{n,n^*} & r_{0n^*}^{(n)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$R_{n,n^*} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где  $R_{n,n^*}$  — матрица поворота, имеющая размерность  $3 \times 3$  и содержащая косинусы углов между соответствующими осями систем координат  $S_n$  и  $S_{n^*}$ .

С учетом выражений (12) и (13) матричное уравнение (11) может быть представлено системой линейных уравнений

$$\begin{cases} \Delta_1 c_{11} = v_x^{(1)} - x_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_1 c_{21} = v_y^{(1)} - y_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_1 c_{31} = v_z^{(1)} - z_{0n^*}^{(n)}. \end{cases} \quad (14)$$

Неизвестными, подлежащими определению, являются коэффициенты  $c_{11}$ ,  $c_{21}$  и  $c_{31}$ , представляющие косинусы углов между осями  $X_n$  и  $X_{n^*}$ ,  $Y_n$  и  $Y_{n^*}$ ,  $Z_n$  и  $Z_{n^*}$  соответственно. Для их определения систему трех уравнений (14) необходимо дополнить четвертым нелинейным уравнением, отражающим свойство базисных векторов

$$c_{11}^2 + c_{21}^2 + c_{31}^2 = 1. \quad (15)$$

Из системы уравнений (14) будем иметь

$$c_{11} = \frac{v_x^{(1)} - x_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_1}, \quad c_{21} = \frac{v_y^{(1)} - y_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_1}, \quad (16)$$

$$c_{31} = \frac{v_z^{(1)} - z_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_1}.$$

Подставляя выражения (16) в уравнения (15) и учитывая, что  $\Delta_1 < 0$ , получим

$$\Delta_1 = -\sqrt{(v_x^{(1)} - x_{0n^*}^{(n)})^2 + (v_y^{(1)} - y_{0n^*}^{(n)})^2 + (v_z^{(1)} - z_{0n^*}^{(n)})^2}. \quad (17)$$

• Шаг 3.

При выполнении третьего шага калибровки ориентации инструмента по трем точкам возможны два варианта действий и, соответственно этому, две математические модели, описывающие эти варианты.

**Вариант 1.** Вершина заостренного наконечника помещается в плоскость  $X_{n^*}Y_{n^*}$  и фиксируется на положительной части оси  $Y_{n^*}$ . Для данного случая могут быть составлены следующие уравнения:

$$r_{\Delta}^{(0)} = {}^{(3)}A_{0,n} A_{n,n^*} r_{\Delta y}^{(n^*)}; \quad (18)$$

$$r_{\Delta y}^{(n^*)} = [0 \ \Delta_2 \ 0 \ 1]^T, \quad (19)$$

где  $\Delta_2$  — расстояние ТСП от вершины заостренного наконечника по оси  $Y_{n^*}$ ,  $\Delta_2 > 0$ .

Приравняв выражения (7) и (18), получим уравнение

$${}^{(1)}A_{0,n} r_{0n^*}^{(n)} = {}^{(3)}A_{0,n} A_{n,n^*} r_{\Delta y}^{(n^*)}. \quad (20)$$

Преобразуем уравнение (20) к виду

$$A_{n,n^*} r_{\Delta y}^{(n^*)} = {}^{(3)}A_{0,n}^{-1} {}^{(1)}A_{0,n} r_{0n^*}^{(n)} = V^{(2)}, \quad (21)$$

где  $V^{(2)} = [v_x^{(2)} \ v_y^{(2)} \ v_z^{(2)} \ 1]^T$  — вектор промежуточных вычислений.

Основываясь на аналогии с шагом 2, можно получить систему уравнений

$$\begin{cases} \Delta_2 c_{12} = v_x^{(2)} - x_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_2 c_{22} = v_y^{(2)} - y_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_2 c_{32} = v_z^{(2)} - z_{0n^*}^{(n)}; \\ c_{12}^2 + c_{22}^2 + c_{32}^2 = 1. \end{cases} \quad (22)$$

Из системы уравнений (22) можно выразить

$$\Delta_2 = -\sqrt{(v_x^{(2)} - x_{0n^*}^{(n)})^2 + (v_y^{(2)} - y_{0n^*}^{(n)})^2 + (v_z^{(2)} - z_{0n^*}^{(n)})^2}; \quad (23)$$

$$c_{12} = \frac{v_x^{(2)} - x_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_2}, \quad c_{22} = \frac{v_y^{(2)} - y_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_2},$$

$$c_{32} = \frac{v_z^{(2)} - z_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_2}. \quad (24)$$

Коэффициенты  $c_{12}$ ,  $c_{22}$  и  $c_{32}$  представляют косинусы углов между осями  $X_n$  и  $Y_{n^*}$ ,  $Y_n$  и  $Y_{n^*}$ ,  $Z_n$  и  $Y_{n^*}$  соответственно.

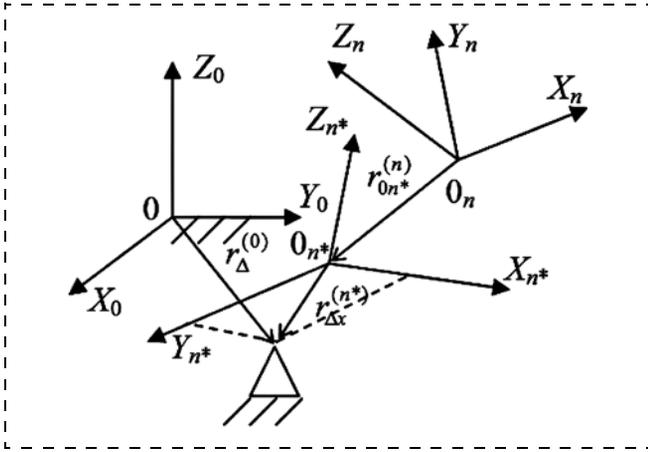


Рис. 4. Перемещение инструмента в плоскости  $X_{n^*}Y_{n^*}$

*Вариант 2.* Вершина заостренного наконечника помещается в плоскость  $X_{n^*}Y_{n^*}$  и фиксируется на ее полуплоскости, соответствующей положительной части оси  $Y_{n^*}$  (рис. 4). Для данного случая могут быть составлены следующие уравнения:

$$r_{\Delta}^{(0)} = {}^{(4)}A_{0,n} A_{n,n^*} r_{\Delta xy}^{(n^*)}; \quad (25)$$

$$r_{\Delta xy}^{(n^*)} = [\Delta_3 \ \Delta_4 \ 0 \ 1]^T, \quad (26)$$

где  $\Delta_3$  и  $\Delta_4$  — координаты заостренного наконечника по осям  $X_{n^*}$  и  $Y_{n^*}$  соответственно;  $\Delta_3 > 0$ ,  $\Delta_4 > 0$ .

Приравняв выражения (7) и (25), получим

$${}^{(1)}A_{0,n} r_{0,n^*}^{(n)} = {}^{(4)}A_{0,n} A_{n,n^*} r_{\Delta xy}^{(n^*)}. \quad (27)$$

Преобразуем уравнение (27) к виду

$$A_{n,n^*} r_{\Delta xy}^{(n^*)} = {}^{(4)}A_{0,n}^{-1} {}^{(1)}A_{0,n} r_{0,n^*}^{(n)} = V^{(3)}, \quad (28)$$

где  $V^{(3)} = [v_x^{(3)} \ v_y^{(3)} \ v_z^{(3)} \ 1]^T$  — вектор промежуточных вычислений.

Система уравнений для данного случая будет иметь вид

$$\begin{cases} \Delta_3 c_{11} + \Delta_4 c_{12} = v_x^{(3)} - x_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_3 c_{21} + \Delta_4 c_{22} = v_y^{(3)} - y_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_3 c_{31} + \Delta_4 c_{32} = v_z^{(3)} - z_{0n^*}^{(n)}; \\ c_{11}c_{12} + c_{21}c_{22} + c_{31}c_{32} = 0; \\ c_{12}^2 + c_{22}^2 + c_{32}^2 = 1. \end{cases} \quad (29)$$

Система уравнений (29) дополнена уравнением, отражающим ортогональность осей  $X_{n^*}$  и  $Y_{n^*}$ .

Дополнительно к обоим вариантам выполнения шага 3 калибровки ориентации инструмента необходимо добавить систему уравнений, позволяю-

щую определить коэффициенты  $c_{13}$ ,  $c_{23}$  и  $c_{33}$ , представляющие косинусы углов между осями  $X_n$  и  $Z_{n^*}$ ,  $Y_n$  и  $Z_{n^*}$ ,  $Z_n$  и  $Z_{n^*}$  соответственно:

$$\begin{cases} c_{11}c_{13} + c_{21}c_{23} + c_{31}c_{33} = 0; \\ c_{12}c_{13} + c_{22}c_{23} + c_{32}c_{33} = 0; \\ c_{13}^2 + c_{23}^2 + c_{33}^2 = 1. \end{cases} \quad (30)$$

Представленные уравнения составляют математическую модель для метода калибровки ориентации инструмента промышленных роботов по трем точкам.

## Заключение

В настоящей статье рассмотрены математические модели для калибровки ориентации инструмента промышленных роботов, соответствующие методам, наиболее распространенным в практике эксплуатации промышленных роботов. Полученные математические модели могут быть использованы в системах управления промышленных роботов. Близкие по данной теме вопросы рассмотрены в работах [7–12].

## Список литературы

1. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.
2. Шахинпур М. Курс робототехники. М.: Мир, 1990. 527 с.
3. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация. М.: Наука, 1989. 368 с.
4. Козлов В. В., Макарычев В. П., Тимофеев А. В., Юрвич Е. И. Динамика управления роботами. М.: Наука, 1984. 336 с.
5. Крахмалев О. Н. Точность управляемого движения промышленных роботов и многокоординатных станков. Брянск: БГТУ, 2015. 236 с.
6. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Расчет и конструирование мехатронных модулей. М.: Изд. МГТУ "СТАНКИН", 2012. 422 с.
7. Зеленский А. А., Подураев Ю. В., Бондарь Д. В. Способ повышения точности интерполяции сложного контура для мехатронных модулей и промышленных роботов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 9. С. 44–48.
8. Крахмалев О. Н., Блейшмидт Л. И. Определение динамической точности манипуляционных систем роботов с упругими шарнирами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 1. С. 29–36.
9. Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И. Коррекция интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 7. С. 491–496.
10. Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И., Федонин О. Н. Математическое обеспечение систем управления промышленными роботами и многокоординатными станками для коррекции влияния на их движение геометрических отклонений // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 3. С. 28–35.
11. Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И., Федонин О. Н. Обеспечение точности многокоординатных станков и промышленных роботов методом коррекции геометрических отклонений // СТИН. 2016. № 11. С. 7–11.
12. Илюхин Ю. В., Подураев Ю. В. Повышение точности мехатронных приводов технологических роботов // СТИН. 2015. № 9. С. 30–37.

# Mathematical Models of the Control Systems for Calibration of the Tools' Orientation for the Industrial Robots

O. N. Krakhmalev, olegkr64@mail.ru✉, D. I. Petreshin, atsys@tu-bryansk.ru,  
G. N. Krakhmalev, genakr73@mail.ru,  
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241036, Russian Federation

Corresponding author: **Krakhmalev Oleg N.**, Ph. D., Associate Professor,  
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241036, Russian Federation,  
e-mail: olegkr64@mail.ru

Received on December 12, 2016

Accepted on June 26, 2017

*Mathematical models of the industrial robots' control systems allow us to calibrate the instruments fixed on the installation of the robot flange. Calibration procedures are carried out when a new industrial robot tool is introduced. Instrument calibration is performed in two stages. The first phase is determination of the tool center point (TCP — Tool Center Point). The second stage includes the act of determination of the orientation of the Cartesian coordinate system, connected with the tool, which is placed at TCP. This article is devoted to the study of the second phase of the final calibration of the instrument. The mathematical models, which describe the transformation of the coordinates for the tool control system, are created automatically, when the instrument calibration procedures begins before introduction of a new instrument into operation. The mathematical models are stored in the permanent memory of the controller in the tool library. This paper introduces a mathematical model for calibration of the tool orientation of the industrial robots, the most common matching methods in practice of operation of the industrial robots. The obtained mathematical model can be used in the control systems of the industrial robots. The resulting mathematical model performs mapping of the TOOL coordinate system in relation to the WORLD coordinate system. The TOOL coordinate system is associated with the tool. The center of the TOOL coordinate system coincides with TCP. The coordinate system of the WORLD is connected with the stationary base of an industrial robot. The BASE coordinate system is connected with the manipulation object. In addition, the position of the BASE coordinate system must be calibrated.*

**Keywords:** industrial robots, instrument calibration, mathematical models, control systems

**Acknowledgements:** The study was carried out with the financial support of the Bryansk State Technical University within the framework of the internal grant No. 135 for 2016, allocated for the development of the software for modeling and control of the industrial robots and multi-axis machines for development of the Mechatronics and Robotics scientific direction.

For citation:

**Krakhmalev O. N., Petreshin D. I., Krakhmalev G. N.** Mathematical Models of the Control Systems for Calibration of the Tools' Orientation for the Industrial Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 664–669.

DOI: 10.17587/mau.18.664-669

## References

1. **Fu K., Gonsales R., Li K.** *Robototekhnika* (Robotics), Moscow, Mir, 1989, 624 p. (in Russian).
2. **Shahinpoor M.** *Kurs robototekhniki* (Robotics course), Moscow, Mir, 1990, 527 p. (in Russian).
3. **Chernous'ko F. L., Bolotnik N. N., Gradetskiy V. G.** *Manipulyatsionnyye roboty: dinamika, upravleniye, optimizatsiya* (Manipulation robots: dynamics, management, optimization), Moscow, Nauka, 1989, 368 p. (in Russian).
4. **Kozlov V. V., Makarychev V. P., Timofeyev A. V., Yurevich Ye. I.** *Dinamika upravleniya robotami* (Dynamics of robot control), Moscow, Nauka, 1984, 336 p. (in Russian).
5. **Krakhmalev O. N.** *Tochnost' upravlyаемого dvizheniya promyshlennykh robotov i mnogokoordinatnykh stankov: monografiya* (The precision controlled movement of industrial robots and multi-axis machines), Bryansk, Publishing house of BGTU, 2015, 236 p. (in Russian).
6. **Yegorov O. D., Podurayev Yu. V.** *Raschet i konstruirovaniye mekhatronnykh moduley* (Calculation and construction of mechatro-

nic modules), Moscow, Publishing house of MGTU "STANKIN", 2012, 422 p. (in Russian).

7. **Zelenskiy A. A., Podurayev Yu. V., Bondar' D. V.** *Sposob povysheniya tochnosti interpoliyatsii slozhnogo kontura dlya mekhatronnykh moduley i promyshlennykh robotov* (A way to improve the accuracy of interpolation of a complex contour for mechatronic modules and industrial robots), *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2011, no. 9, pp. 44–48. (in Russian).

8. **Krakhmalev O. N., Bleishmidt L. I.** *Opreделение динамической точности манипуляционно-транспортных систем роботов с упругими шарнирами* (Determination of Dynamic Accuracy of Manipulation Systems of Robots with Elastic Hinges), *Problemy Mashinostroyeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2014, no. 1, pp. 29–36 (in Russian).

9. **Krakhmalev O. N., Petreshin D. I.** *Korrektziya integral'nykh otkloneniy dvizheniya ispolnitel'nykh mekhanizmov promyshlennykh robotov i mnogokoordinatnykh stankov* (Correction of the integral of deviations of movement of actuators of industrial robots and multi-axis machines), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 491–496 (in Russian).

10. **Krakhmalev O. N., Petreshin D. I., Fedonin O. N.** *Matematicheskoe obespechenie sistem upravleniya promyshlennymi robotami i mnogokoordinatnymi stankami dlya korrektsii vliyaniya na ikh dvizhenie geometricheskikh otkloneniy* (Software of control systems for industrial robots and multi-axis machines for the correction effect on the movement of geometric deviations), *Problemy Mashinostroyeniya i Avtomatizatsii*, 2016, no. 3, pp. 28–35 (in Russian).

11. **Krakhmalev O. N., Petreshin D. I., Fedonin O. N.** *Obespechenie tochnosti mnogokoordinatnykh stankov i promyshlennykh robotov metodom korrektsii geometricheskikh otkloneniy* (Ensuring the accuracy of multi-axis machine tools, and industrial robots by the correction of geometric deviations), *STIN*, 2016, no. 11, pp. 7–11. (in Russian).

12. **Ilyukhin Yu. V., Podurayev Yu. V.** *Povysheniye tochnosti mekhatronnykh privodov tekhnologicheskikh robotov* (Increase the accuracy of mechatronic drives of technological robots), *STIN*, 2015, no. 9, pp. 30–37 (in Russian).

**А. В. Гулай**, канд. техн. наук, зав. кафедрой, is@bntu.by, **В. М. Зайцев**, канд. техн. наук, доц., is@bntu.by, Белорусский национальный технический университет, Минск

## Интеллектуальные технологии оперативного функционального контроля многопараметрических систем

*Предложены принципы организации оперативного функционального контроля сложной многопараметрической системы с сохранением процесса ее работы в контуре управления. Построена высокоскоростная модель системы, основанная на проведении предварительных эмпирических исследований и использовании результатов регрессионного анализа системы в организации оперативного контроля на основе аппарата нечеткой логики. Экспертным путем устанавливаются возможные интервалы фактических значений входных параметров, и для каждого их набора с помощью коэффициентов уравнений регрессии, операций нечеткой арифметики и максиминного обобщения выстраиваются функции принадлежности результативных выходных и внутренних переменных к требуемым нечетким множествам.*

**Ключевые слова:** многопараметрические системы, функциональный контроль, интеллектуальные технологии, нечеткие множества, регрессионные модели

### Введение

Сложные многопараметрические системы требуют периодического контроля и диагностики в целях повышения надежности их функционирования. Обычно для этого применяются заранее подготовленные тесты отдельных трактов преобразования вещества, энергии или информации и тесты комплексного функционирования систем с фиксированными наборами входных проверочных материалов и эталонными результатами их прохождения в системах. Для проведения тестового контроля и диагностики сами системы или части систем должны предварительно выводиться из режима целенаправленного функционирования. Таким образом, на практике тестовый контроль и диагностика возможны либо при временном выводе систем или отдельных их частей из контуров управления, либо при проведении планово-предупредительных мероприятий [1].

Комплексный функциональный контроль, выполняемый непосредственно при работе системы без изъятия каких-либо ее частей из контуров управления, принято относить к категории оперативного. Для организации оперативного контроля системы требуется создание достаточно точной модели ее функционирования. Однако сложность реальных систем, различная физическая природа и многофакторность протекающих в них процессов приводят к практической невозможности построения адекватных аналитических соотношений между входными и выходными параметрами системы. Применение вероятностных методов и моделей также оказывается малоэффективным, так как требует от описания системных процессов

проявления достаточной устойчивости статистических закономерностей.

При реализации указанных моделей требуются значительные затраты времени на формирование системных эталонов, что практически исключает возможность их реального использования. По этим причинам большинство систем оказываются полноценно не охваченными средствами комплексного функционального контроля в процессе штатной работы.

### Задачи оперативного функционального контроля в создании сложных многопараметрических систем

Схема выполнения оперативного функционального контроля сложной многопараметрической системы представлена на рисунке. Она предусматривает сохранение процессов функционирования контролируемой системы в контурах управления и использование реальных входных материалов для реализации контрольных проверок. В соответствии с этой схемой требуется применение блока выработки решений о согласованности результатов функционирования системы и результатов оперативного формирования системных эталонов результативных выходных  $y_{jM}[t]$  и внутренних  $z_{kM}[t]$  параметров. Естественно, что для оперативного формирования системных эталонов должна применяться высокоскоростная и адекватная модель, работающая в масштабе времени процессов системы.

В вопросах организации оперативного функционального контроля важную роль играют эмпирические исследования реальных системных процессов. Эти исследования основаны на использовании методов, в реализации которых преобладают натурные сенсорные эксперименты над системами.

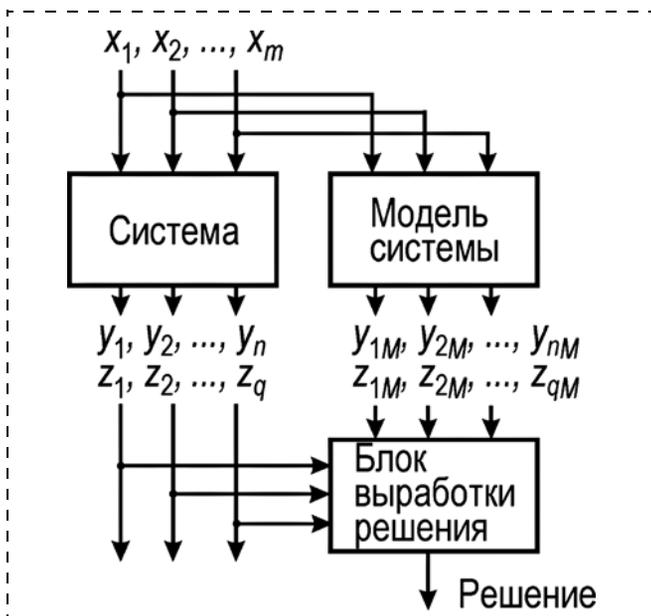


Схема организации и проведения оперативного функционального контроля многопараметрической системы

Такие эксперименты обеспечивают получение в качестве результатов контроля (диагностики, мониторинга) фактических значений системных параметров, представляющих теоретический и практический интерес для аналитиков и системотехников. Необходимым условием эффективности эмпирических исследований являются наблюдаемость и измеримость параметров, а также возможность повторения опытов для подтверждения или опровержения правильности принимаемых системотехнических решений [1].

Рассмотрим возможность построения модели системных процессов, сочетающей в себе эмпирические, статистические, алгоритмические и эвристические приемы отображения системных параметров и связей между ними. В процессе экспериментов аналитики и системотехники получают для некоторых моментов времени наблюдения  $t = t_1, t_2, \dots, t_u$  выборки значений системных параметров — входных (факторных)  $X[i, t]$ , результативных выходных  $Y[j, t]$  и результативных внутренних  $Z[k, t]$ :

$$X[i, t] = \{x_i[t]\}, i = 1, 2, \dots, m;$$

$$Y[j, t] = \{y_j[t]\}, j = 1, 2, \dots, n;$$

$$Z[k, t] = \{z_k[t]\}, k = 1, 2, \dots, q.$$

Обычно выборки получаемых значений отражаются с помощью таблицы корреляционных полей, обеспечивающей "расслоение" параметров, для чего желательно, чтобы выполнялось условие  $u \geq 2m$ . Методология эмпирических исследований требует валидности и надежности получаемых данных, которые по смысловому составу и своим значениям должны отвечать целям и задачам системного анализа и допускать распространение синтезируемых выводов на соответствующие системные процессы.

Решению проблем, связанных с созданием многопараметрических систем и средств их опера-

тивного функционального контроля, может способствовать применение факторного анализа, выполняемого в технологическом режиме [2, 3]. На стадии предварительного исследования он обеспечивает всестороннее описание процессов, протекающих в системах, и в принципе позволяет сформировать обозримые и компактные зависимости между входными, выходными и внутренними параметрами. С помощью факторного анализа возможно выявление латентных (скрытых) факторов, реально обуславливающих наличие корреляционных связей между наблюдаемыми значениями. При этом достигаются следующие цели: определение и оценка взаимосвязи между переменными системы; сокращение числа переменных, необходимых для системного анализа.

Скрытые статистические связи между параметрами системы приводят к их условному группированию. Корреляция значений входных параметров внутри одной группы оказывается гораздо выше, чем корреляция со значениями параметров других групп. Это позволяет для каждой группы реальных переменных поставить в соответствие некоторую укрупненную латентную переменную, которую называют фактором. Каждый фактор условно "объединяет" сильно коррелированные входные параметры в группу и в дальнейшем может представлять группу в операциях системного анализа. В частном случае один фактор может соответствовать одной входной переменной. Выявление наиболее значимых факторов вполне эффективно осуществляется с применением метода главных компонент — практически единственного метода анализа параметров, имеющего достаточно строгое математическое обоснование.

### Применение модели регрессии в организации оперативного функционального контроля системы

В целях предварительного установления функциональных зависимостей между выходными или внутренними параметрами исследуемой системы и входными (факторными) параметрами в пределах корреляционных полей может быть использована регрессионная модель [3, 4]. Путем экстраполяции и интерполяции значений результативных параметров модель регрессии позволяет проводить прогнозирование поведения системы как внутри корреляционных полей, так и в ограниченных пределах за их границами.

Процесс построения регрессионной модели предусматривает выполнение следующих этапов.

**А** — этап спецификации: определяются виды функций  $\{F_{y_j}\}, \{F_{z_k}\}$ , описывающих функциональную связь между результативными параметрами и входными (факторными) параметрами:

$$\{y_j[t] = F_{y_j}(x_1[t], x_2[t], \dots, x_m[t]),$$

$$\{z_k[t] = F_{z_k}(x_1[t], x_2[t], \dots, x_m[t])\}.$$

**Б** — этап идентификации: рассчитываются коэффициенты регрессии. В системах технического назначения для получения значений результативных выходных  $y_j^*[t]$  и внутренних  $z_k^*[t]$  параметров достаточно эффективным является применение линейных моделей с коэффициентами "чистой" регрессии  $\alpha_{j0}, \alpha_{j1}, \alpha_{j2}, \dots, \alpha_{jm}; \beta_{k0}, \beta_{k1}, \beta_{k2}, \dots, \beta_{km}$ :

$$\{y_j^*[t] = \alpha_{j0} + \alpha_{j1}x_1[t] + \alpha_{j2}x_2[t] + \dots + \alpha_{jm}x_m[t]\};$$

$$\{z_k^*[t] = \beta_{k0} + \beta_{k1}x_1[t] + \beta_{k2}x_2[t] + \dots + \beta_{km}x_m[t]\}.$$

Указанные коэффициенты регрессии, входящие в регрессионную модель, определяются с использованием методики аппроксимации по критерию наименьших квадратов. При этом минимизируется сумма квадратов отклонений расчетных значений  $y_j^*[t], z_k^*[t]$  от соответствующих наблюдаемых значений  $y_j[t], z_k[t]$  в точках  $t = t_1, t_2, \dots, t_u$ :

$$\{E_{y_j} = \sum_t [y_j[t] - y_j^*[t]]^2 \rightarrow \min\};$$

$$\{E_{z_k} = \sum_t [z_k[t] - z_k^*[t]]^2 \rightarrow \min\}.$$

**В** — этап расчета результативных параметров: находятся значения  $y_j^*[t], z_k^*[t]$  результативных параметров для отдельных наборов значений входных параметров (факторов).

**Г** — этап анализа: проводится оценка отклонений расчетных значений результативных параметров от эмпирических данных и проверка соответствующих статистических гипотез о регрессии.

Коэффициенты регрессии для каждого из результативных параметров являются корнями систем линейных алгебраических уравнений. Рассмотрим один из функционалов в виде суммы квадратов отклонений  $E_{y_j}$ . Для минимизации функционала достаточно найти коэффициенты  $\alpha$ , обращающие в ноль частные производные в точках наблюдения  $t$ :

$$\{\partial E_{y_j} / \partial \alpha_{ji} = -2\alpha_{j0} \sum_t [y_j[t] - y_j^*[t]] = 0\}.$$

Эта система состоит из  $m + 1$  линейных алгебраических уравнений относительно группы коэффициентов  $\alpha$ . Решение уравнений обеспечивает построение рассматриваемой группы коэффициентов множественной регрессии. Аналогичным образом определяются коэффициенты всех других групп, в том числе группы коэффициентов  $\beta$ .

Качество полученной модели характеризуется определенными статистическими свойствами и точностью (степенью близости к фактическим данным). Оценка качества модели проводится путем исследования гипотез о значимости модели в целом и каждого ее параметра, оценки доверительных интервалов и, в общем случае, анализа остатков. Однако при использовании метода наименьших квадратов последний способ проверки теоретически является излишним.

Модель считается приемлемой со статистической точки зрения, если она адекватна и имеет достаточную точность. Средняя относительная ошибка

при моделировании определяется следующим соотношением:

$$E_{\text{отн}y_j} = u^{-1} \sum \{[y_j[t] - y_j^*[t]]/y_j[t]\}.$$

Уровень точности считается высоким, если  $E_{\text{отн}y_j} \leq 0,05$ , и приемлемым при  $0,05 < E_{\text{отн}y_j} \leq 0,15$ .

Аналогичным образом оценивается уровень точности  $E_{\text{отн}z_k}$ .

Предварительные эмпирические исследования системы и построение регрессионной модели, в принципе, позволяют выполнять формирование приближенных оперативных системных эталонов результативных параметров. Однако в силу самой природы регрессионной модели, ее разведывательного характера, который отражает, прежде всего, основные тенденции, построение модели сопровождается большим объемом необходимых вычислений. При этом значительно возрастает время практического определения значений коэффициентов регрессии и прогнозируемых результативных параметров.

Кроме того, в данном случае знания о предметной области системы могут быть неясными или неполными, а измерения — неточными, или могут содержать методические изъяны. Существует также возможность практического использования лишь недостаточно строгих концепций управления при одновременной необходимости обеспечения принципиального функционирования систем в условиях существования различных НЕ-факторов или малоизученных явлений. В таком случае целесообразно привлечение формального аппарата для работы с неопределенностями, который получил название нечеткой логики (fuzzy logic). Теория нечетких множеств (fuzzy set theory) представляет собой формализм, предназначенный для формирования суждений именно при наличии НЕ-факторов.

Будем полагать, что предварительные эмпирические исследования системы и построение регрессионной модели выполнены, а на этапе идентификации для корреляционных полей рассчитаны коэффициенты регрессии  $\alpha, \beta$ . Интерпретация входных переменных как элементов нечетких множеств позволяет, в свою очередь, рассматривать результативные выходные и внутренние параметры системы в качестве представителей нечетких множеств, состав и назначение которых зависят от функций и режимов работы. Очевидно, что при условии нахождения значений входных переменных в диапазонах используемых корреляционных полей тенденции, определяемые уравнениями регрессии, нарушаться не должны. Это позволяет применить указанные уравнения для оперативного построения функций принадлежности результативных выходных и внутренних переменных к соответствующим нечетким множествам.

Коэффициенты уравнений регрессии следует рассматривать в качестве четких декларативных данных базы знаний интеллектуальных средств функционального контроля.

**Принципы преобразования параметров контролируемой многопараметрической системы в лингвистические переменные**

Значениями лингвистических переменных являются не числа, а некоторые словесные предложения естественного языка, которые образуют терм-множества [5, 6]. Любой элемент терм-множества как некоторое словесное значение лингвистической переменной считается термом. Формально терм задается с помощью функции его принадлежности к определенному нечеткому множеству.

Предлагается использовать три естественных типа лингвистических переменных: входной параметр с номером  $i$ ; выходной результативный параметр с номером  $j$ ; внутренний результативный параметр с номером  $k$ . В каждом терм-множестве для каждой лингвистической переменной зададим следующие термы:

- термы  $T_{др}(x_i), T_{др}(y_j), T_{др}(z_k)$  из состава терм-множеств областей допустимых рабочих значений входных, выходных и внутренних параметров (ДР $i$ , ДР $j$ , ДР $k$ );
- термы  $T_{нп}(x_i), T_{нп}(y_j), T_{нп}(z_k)$  из состава терм-множеств областей нижних предупредительных границ для значений входных, выходных и внутренних параметров (НП $i$ , НП $j$ , НП $k$ );
- термы  $T_{вп}(x_i), T_{вп}(y_j), T_{вп}(z_k)$  из состава терм-множеств областей верхних предупредительных границ для значений входных, выходных и внутренних параметров (ВП $i$ , ВП $j$ , ВП $k$ );
- термы  $T_{на}(y_j), T_{на}(z_k)$  из состава терм-множеств областей нижних аварийных границ для значений выходных и внутренних параметров (НА $j$ , НА $k$ );
- термы  $T_{ва}(y_j), T_{ва}(z_k)$  из состава терм-множеств областей верхних аварийных границ для значений выходных и внутренних параметров (ВА $j$ , ВА $k$ ).

Термам будут соответствовать нечеткие множества реальных значений параметров, ограниченные нижними и верхними пределами интервалов, которые, в принципе, допускают пересечения:

$$\{(X_{i \text{ нп-н}}, X_{i \text{ нп-в}}), (X_{i \text{ др-н}}, X_{i \text{ др-в}}), (X_{i \text{ вп-н}}, X_{i \text{ вп-в}})\};$$

$$\{(Y_{j \text{ на}}, Y_{j \text{ нп-н}}), (Y_{j \text{ нп-н}}, Y_{j \text{ нп-в}}), (Y_{j \text{ др-н}}, Y_{j \text{ др-в}}), (Y_{j \text{ вп-н}}, Y_{j \text{ вп-в}}), (Y_{j \text{ вп-в}}, Y_{j \text{ ва}})\};$$

$$\{(Z_{q \text{ на}}, Z_{q \text{ нп-н}}), (Z_{q \text{ нп-н}}, Z_{q \text{ нп-в}}), (Z_{q \text{ др-н}}, Z_{q \text{ др-в}}), (Z_{q \text{ вп-н}}, Z_{q \text{ вп-в}}), (Z_{q \text{ вп-в}}, Z_{q \text{ ва}})\}.$$

Параметры могут иметь как непрерывную, так и дискретную природу. При пересечении указанных нечетких множеств в рамках одного параметра преимущество в определении конкретного расположения результата фактического измерения или расчета входных переменных целесообразно отдавать областям предупредительных границ, а выходных и внутренних переменных — областям аварийных границ. Реакции системы на аварийные значения входных переменных должны обеспечивать их блокировку и предотвращение дальнейшего распространения по системе.

На основе экспериментальных данных и экспертных оценок необходимо предварительно сформировать функции принадлежности входных параметров

$$\{W_{x_i}(x_i) \in \{W_{нп}(x_i), W_{др}(x_i), W_{вп}(x_i)\}\}$$

к нечетким множествам соответствующих термов:

$$\{T_{x_i}(x_i) \in T_{tm \ i} = \{T_{нп}(x_i), T_{др}(x_i), T_{вп}(x_i)\},$$

где  $T_{tm \ i}$  — терм-множество для входной переменной  $x_i$ .

Операции могут выполняться в технологическом режиме, и для  $m$  входных переменных максимальное число функций принадлежности составит  $3m$ . Для выходных и внутренних переменных экспериментальным путем оцениваются и экспертно уточняются только ожидаемые границы диапазонов возможного размещения их значений.

Рассмотренные сведения образуют декларативную экспертную часть базы знаний. Организация эффективного оперативного функционального контроля системы диктует необходимость синтеза функций принадлежности результативных выходных и внутренних параметров к соответствующим нечетким множествам в межконтрольные периоды в заданном темпе выполнения операций контроля:

$$\{W_{y_j}(y_j) \in \{W_{на}(y_j), W_{нп}(y_j), W_{др}(y_j), W_{вп}(y_j), W_{ва}(y_j)\},$$

$$\{W_{z_k}(z_k) \in \{W_{на}(z_k), W_{нп}(z_k), W_{др}(z_k), W_{вп}(z_k), W_{ва}(z_k)\}.$$

При выполнении процедур синтеза состав операндов и схема обработки зависят от результатов приема в систему конкретного набора фактических значений входных параметров и оценки их принадлежности тем или иным областям. При этом должны соблюдаться следующие соотношения между функциями принадлежности, диктуемые уравнениями регрессии:

$$\{W_{y_j}(y_j) = \alpha_{j0} + \alpha_{j1}W_{x1}(x_{j1}) + \alpha_{j2}W_{x2}(x_{j2}) + \dots + \alpha_{jm}W_{xm}(x_{jm})\};$$

$$\{W_{z_k}(z_k) = \beta_{k0} + \beta_{k1}W_{x1}(x_{k1}) + \beta_{k2}W_{x2}(x_{k2}) + \dots + \beta_{km}W_{xm}(x_{km})\}.$$

Функции принадлежности конкретных параметров к каждой отдельной области целесообразно задавать с учетом их дискретной аппроксимации линейными сплайнами. Увеличение числа сплайнов в аппроксимации функций принадлежности потенциально увеличивает точность расчетов, но сопровождается лавинообразным увеличением вычислительной сложности процедур и, следовательно, ростом затрат времени на вычисления. Опыты по аппроксимации показывают, что для дискретного представления функций принадлежности входных переменных достаточно применять семиточечные (шестисплайновые) представления, а для выходных и внутренних переменных — девятиточечные (восьмисплайновые) представления. Такие представления обеспечивают полноценное отобра-

жение линейных, треугольных, П-образных, S-образных и других функций принадлежности.

Все операции процедур будем проводить только с нормальными ( $\max W = 1$ ) или с субнормальными ( $W < 1$ ) функциями принадлежности.

Интервальные значения входных, выходных и внутренних переменных, а также функции принадлежности входных переменных соответствующим интервалам как нечетким множествам образуют экспертную часть базы знаний интеллектуальных средств функционального контроля.

### Формирование функций принадлежности результативных переменных контролируемой многопараметрической системы

Объективные потребности в синтезе функций принадлежности результативных выходных и внутренних параметров к соответствующим нечетким множествам на каждом наборе значений входных переменных приводят к необходимости оперативной реализации операций нечеткой арифметики. Арифметические операции  $\bullet$  (+, -,  $\times$ , /) над указанными нечеткими множествами выполняются следующим образом. Для момента времени  $t$  значение входного параметра  $x_i[t] \in X[i, t] = \{x_i[t]\}$  попадает в одно из нечетких множеств областей НП*i*, ДР*i* или ВП*i*, а значение параметра  $x_{i+a}[t] \in X[i, t] = \{x_i[t]\}$  — в одно из нечетких множеств областей НП*i* +  $a$ , ДР*i* +  $a$ , ВП*i* +  $a$  с семиточечными функциями принадлежности:

$$W_{x, i}[w_{x, i}(1)/x_i(1); w_{x, i}(2)/x_i(2); \dots; w_{x, i}(7)/x_i(7)],$$

$$W_{x, i+a}[w_{x, i+a}(1)/x_{i+a}(1), w_{x, i+a}(2)/x_{i+a}(2), \dots, w_{x, i+a}(7)/x_{i+a}(7)].$$

В результате выполнения любой из указанных выше арифметических операций с общим обозначением " $\bullet$ " должно быть сформировано нечеткое множество результата  $C = X_i \bullet X_{i+a}$  с семиточечной функцией принадлежности  $W_C[w_C(1)/c(1), w_C(2)/c(2), \dots, w_C(7)/c(7)]$ , где  $w_{x, i}(\varphi)$ ,  $w_{x, i+a}(\varphi)$ ,  $w_C(\varphi)$  — дискретные значения функций принадлежности;  $x_i(\varphi)$ ,  $x_{i+a}(\varphi)$ ,  $c(\varphi)$  — соответствующие элементы нечетких множеств для  $\varphi = 1, 2, \dots, 7$ .

Значения  $c(\varphi) = x_i(\varphi) \bullet x_{i+a}(\varphi)$  вычисляются по правилам обычной арифметики, однако возникает нарушение принципа однозначности рассматриваемых арифметических операций: для  $\xi$ -точечной аппроксимации функции принадлежности первого операнда и  $\psi$ -точечной аппроксимации функции принадлежности второго операнда образуется  $\rho = \xi \times \psi$  потенциальных результатов. При семиточечных функциях принадлежности следует ожидать получения 49 результирующих значений:

$$c(1) = x_i(1) \bullet x_{i+a}(1), c(2) = x_i(1) \bullet x_{i+a}(2), \dots, c(7) = x_i(1) \bullet x_{i+a}(7),$$

$$c(8) = x_i(2) \bullet x_{i+a}(1), c(9) = x_i(2) \bullet x_{i+a}(2), \dots, c(14) = x_i(2) \bullet x_{i+a}(7),$$

• • •

$$c(43) = x_i(7) \bullet x_{i+a}(1), c(44) = x_i(7) \bullet x_{i+a}(2), \dots, c(49) = x_i(7) \bullet x_{i+a}(7).$$

В условиях нечетких множеств на указанных выше интервалах могут быть подобраны различные пары значений  $x_i(\varphi = \xi)$ ,  $x_{i+a}(\varphi = \sigma)$ , которые будут, с одной стороны, соответствовать функциям принадлежности  $W_{x, i}$ ,  $W_{x, i+a}$  и, с другой стороны, давать одинаковые результаты  $c(\varphi)$  или результаты, достаточно близкие к этому значению, например,  $c(\varphi)[1 \pm (0,03 \dots 0,05)]$ . Это приводит к образованию групп потенциальных результатов:

$$c(\varphi = 1) = x_i(\varphi = \xi_{11}) \bullet x_{i+a}(\tau = \sigma_{11}) \cong \dots \cong x_i(\varphi = \xi_{1d}) \bullet x_{i+a}(\varphi = \sigma_{1d});$$

$$c(\varphi = 2) = x_i(\varphi = \xi_{21}) \bullet x_{i+a}(\tau = \sigma_{21}) \cong \dots \cong x_i(\varphi = \xi_{2e}) \bullet x_{i+a}(\varphi = \sigma_{2e});$$

• • •

$$c(\varphi = g) = x_i(\varphi = \xi_{g1}) \bullet x_{i+a}(\tau = \sigma_{g1}) \cong \dots \cong x_i(\varphi = \xi_{gt}) \bullet x_{i+a}(\varphi = \sigma_{gt}).$$

Возможное число групп  $g$  определяет потенциальное число элементов в нечетком множестве результатов операции. Для семиточечных функций значение  $g$  может колебаться от 2 при плотном группировании до 49 при разреженном группировании. Как число групп  $g$ , так и число одинаковых или близких значений  $d, e, \dots, \tau$  в каждой группе заранее предсказать достаточно трудно. Но в каждой группе отдельные одинаковые или близкие по значениям результаты будут иметь индивидуальные значения функций принадлежности. В конечном итоге группа должна быть подвергнута компрессии, из каждой группы выбирается и сохраняется только один представитель.

Рассмотрим одну из групп  $\varphi = v$  ( $v = 1, 2, \dots, g$ ), соответствующую некоторому значению результата

$$c(\varphi = v) = x_i(\varphi = \xi_{v1}) \bullet x_{i+a}(\tau = \sigma_{v1}) \cong \dots \cong x_i(\varphi = \xi_{vh}) \bullet x_{i+a}(\varphi = \sigma_{vh}).$$

Она содержит  $h$  одинаковых или достаточно близких значений. При компрессии для результата  $c(\varphi = v)$  требуется определить значение функции  $w_C(v)$ . На этой стадии искомое значение  $w_C(v)$  устанавливается на основании двухпроходной процедуры, реализующей технологию максимина Л. Заде:

$$w_C(v) = \max\{w_{\varphi = v}, \pi = \min\{w_{x, i}[x_i(\varphi = \xi_{v\pi})], w_{x, i+a}[x_{i+a}(\tau = \sigma_{v\pi})]\}, \pi = 1, 2, \dots, h.$$

На первом проходе для каждой  $\pi$ -й пары операндов  $x_i(\varphi = \xi_{v\pi})$ ,  $x_{i+a}(\tau = \sigma_{v\pi})$ , которые участвуют в формировании соответствующего результата, входящего в группу, отбирается минимальное значение  $w_{\varphi = v, \pi}$  из пары значений их функций принадлежностей  $w_{x, i}[x_i(\varphi = \xi_{v\pi})]$ ,  $w_{x, i+a}[x_{i+a}(\tau = \sigma_{v\pi})]$ . Число пар равно  $\pi$ . На втором проходе находится максимальное значение из выбранных минимальных значений  $w_C(v) = \max\{w_{\varphi = v, \pi}\}$ . Таким образом, для

результата выполнения операции формируется  $g$ -точечная функция принадлежности:

$$W_C[w_C(1)/c(1); w_C(2)/c(2); \dots; w_C(g)/c(g)].$$

Если одним из операндов является четкое постоянное число  $\text{const}$ , то его функция принадлежности считается равной 1.

Синтез искомой семиточечной функции принадлежности  $W_C[w_C(1)/c(1), w_C(2)/c(2), \dots, w_C(7)/c(7)]$  заключается в прореживании  $g$ -точечной функции принадлежности. С этой целью в качестве первой и седьмой пар назначаются пары  $g$ -точечной функции, удовлетворяющие условиям

$$\begin{aligned} w_{C(\varphi)}(1)/c(1) &= \min\{w_{C(\varphi)}(\varphi)/c(\varphi)\}; \\ w_{C(\varphi)}(7)/c(7) &= \max\{w_{C(\varphi)}(\varphi)/c(\varphi)\}. \end{aligned}$$

Граничные значения  $c(7)$ ,  $c(1)$  задают диапазон возможных значений нечеткого множества результата. Этот диапазон предлагается разбивать на шесть интервалов с одинаковой протяженностью. Оставшиеся пары  $g$ -точечной функции по значениям  $c(\varphi)$  сортируются по указанным интервалам с последующей заменой каждой совокупности отобранных пар одной парой. Если в некоторый интервал с граничными значениями  $c(1) + sD$ ;  $c(1) + (s + 1)D$ ,  $s = 0, 2, \dots, 5$ , попадает совокупность из  $U$  пар

$$\begin{aligned} w_C[c_{(\varphi=v_1)}^{(s)}/c_{(\varphi=v_1)}^{(s)}]; w_C[c_{(\varphi=v_2)}^{(s)}/c_{(\varphi=v_2)}^{(s)}]; \\ \dots; w_C[c_{(\varphi=v_U)}^{(s)}/c_{(\varphi=v_U)}^{(s)}], \end{aligned}$$

то в качестве значения  $c(\varphi = 1 + S)$  естественно выбрать среднюю величину:

$$\begin{aligned} c(\varphi = 1 + s) &= \\ &= [c_{(\varphi=v_1)}^{(s)} + c_{(\varphi=v_2)}^{(s)} + \dots + c_{(\varphi=v_U)}^{(s)}]/U. \end{aligned}$$

Функцию принадлежности  $w_C(1 + s)$ , соответствующую точке  $c(\varphi = 1 + s)$ , целесообразно находить путем расчета центра тяжести функции принадлежности рассматриваемой совокупности:

$$\begin{aligned} w_C(\varphi = 1 + s)/c(\varphi = 1 + s) &= \\ &= \{w_C[c_{(\varphi=v_1)}^{(s)}/c_{(\varphi=v_1)}^{(s)}]c_{(\varphi=v_1)}^{(s)} + w_C[c_{(\varphi=v_2)}^{(s)}/c_{(\varphi=v_2)}^{(s)}]c_{(\varphi=v_2)}^{(s)} + \\ &+ \dots + w_C[c_{(\varphi=v_U)}^{(s)}/c_{(\varphi=v_U)}^{(s)}]c_{(\varphi=v_U)}^{(s)}\} / \{c_{(\varphi=v_1)}^{(s)} + c_{(\varphi=v_2)}^{(s)} + \\ &+ \dots + c_{(\varphi=v_U)}^{(s)}\}^{-1}. \end{aligned}$$

Последовательное применение рассмотренных процедур позволяет синтезировать каждую из функций принадлежности результативных выходных или внутренних параметров к соответствующим нечетким множествам в виде семиточечных представлений  $\{W_{y_j}^{(7)}(y_j)\}$ ,  $\{W_{z_k}^{(7)}(z_k)\}$ . Заключительная стадия синтеза указанных функций предпола-

гает преобразование семиточечных представлений функций принадлежности в девятиточечные:

$$\begin{aligned} W_{y_j}^{(7)}(y_j)[w_{C_y}(1)/c_y(1), \dots, w_{C_y}(7)/c_y(7)] \rightarrow \\ \rightarrow W_{y_j}(y_j)[w_{C_y}(0)/c_y(0), \dots, w_{C_y}(8)/c_y(8)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{z_k}^{(7)}(z_k)[w_{C_z}(1)/c_z(1), \dots, w_{C_z}(7)/c_z(7)] \rightarrow \\ \rightarrow W_{z_k}(z_k)[w_{C_z}(0)/c_z(0), \dots, w_{C_z}(8)/c_z(8)]. \end{aligned}$$

С этой целью экспертно назначается протяженность областей НА и ВА в виде значений  $\Delta_{НА}$  и  $\Delta_{ВА}$  соответственно. При этом

$$\begin{aligned} c_y(0) &= c_y(1) - \Delta_{НА} \geq 0; c_y(8) = c_y(7) + \Delta_{ВА}; \\ c_z(0) &= c_z(1) - \Delta_{НА} \geq 0; c_z(8) = c_z(7) + \Delta_{ВА}; \\ w_{C_y}(0) &= w_{C_y}(9) = w_{C_z}(0) = w_{C_z}(9) = 0. \end{aligned}$$

Схемы и процедуры оперативного формирования функций принадлежности результативных выходных и внутренних переменных системы к соответствующим нечетким множествам на основе операций нечеткой арифметики и максиминного обобщения Л. Заде составляют процедурную часть базы знаний.

#### Применение нечетких продукционных правил для формирования выводов о результатах контроля

Продукционная система задается некоторым множеством продукций  $\{PR_r\}$  и соответствующими группами продукционных правил, образующих эти продукции. Каждая продукция позволяет сформировать определенный вывод или заключение в виде логического следования. Типовая модель  $s$ -го правила  $r$ -й продукции  $PR_r$  представляет собой кортеж следующего вида:

$$N_{rs}; \langle S_{rs}; U_{rs}; \text{Ant}_{rs} \rightarrow \text{Cons}_{rs}; PU_{rs}; (F_{rs}); \text{Comment}_{rs} \rangle,$$

где  $N_{rs}$  — индивидуальный номер правила;  $S_{rs}$  — идентификатор области или класса ситуаций, в которых предполагается использование правила;  $U_{rs}$  — формализованное условие применения правила;  $\text{Ant}_{rs} \rightarrow \text{Cons}_{rs}$  — ядро правила, по смыслу соответствующее логической конструкции "если (if)  $\text{Ant}_{rs}$ , то (then)  $\text{Cons}_{rs}$ ";  $\text{Ant}_{rs}$  — антецедентная группа ядра;  $\text{Cons}_{rs}$  — консеквентная группа ядра;  $PU_{rs}$  — формализованное постусловие в виде спецификации действий, подлежащих выполнению после использования правила;  $F_{rs}$  — весовой коэффициент правила в группе правил продукции;  $\text{Comment}_{rs}$  — неформализованные комментарии (например, спецификация особенностей использования правила, время его введения в базу, продолжительность разрешенного интервала времени применения правила). Элементы  $N_{rs}$ ,  $S_{rs}$ ,  $U_{rs}$ ,  $PU_{rs}$ ,  $F_{rs}$ ,  $\text{Comment}_{rs}$  являются факультативными.

Для оперативного решения задач контроля и управления в системах технического назначения должны быть заблаговременно синтезированы со-

вокупность продукций и группа правил, обеспечивающих формирование логических следований. Под логическими следованиями будем понимать обоснованные управленческие выводы или заключения, которые определяют поведение системы при определенных условиях в тех или иных ситуациях. Управленческие выводы и заключения требуются строить на основе исходных утверждений или посылок, в качестве которых в большинстве случаев выступают декларативные знания и выявленные текущие состояния системы, а также их актуальные фактографические физико-технические параметры.

Отличительной чертой четкого логического следования является возможность его отображения всего одной строкой таблицы истинности операции импликации. Оно является истинным только в том случае, если антецедентная и консеквентная группы ядра одновременно являются истинными с уровнями истинности  $W_A = 1$ ,  $W_C = 1$  соответственно. Теория четкого логического следования в принципе не содержит правил, позволяющих перейти от истинных антецедентов к консеквентам, для которых  $W_C < 1$ .

В теории нечеткого логического следования антецедентная и консеквентная группы ядра могут иметь уровни истинности  $W_A \leq 1$ ,  $W_C \leq 1$ . Для нечеткого логического следования уровень истинности  $W_{нч}$  устанавливается в соответствии с выражением

$$W_{нч} = \min\{W_A, W_C\} \leq 1.$$

Рассмотрим особенности конструкций антецедентных и консеквентных частей правил, на основе которых могут формироваться логические следования в средствах оперативного функционального контроля.

Одно алгебраическое отношение  $\langle A_1 \rangle$  (алгебраическая операция отношения)  $\langle A_2 \rangle$ , построенное на основе алгебраических выражений  $A_1$ ,  $A_2$  и соединяемое с другими алгебраическими отношениями с помощью логических операций, соответствует самостоятельному подусловию антецедентной части Ant. Указанная антецедентная часть может включать  $m$  подусловий.

Консеквентная часть правила четкого логического следования образуется с помощью некоторых алгебраических выражений и операций "равно". Эта консеквентная часть может содержать несколько равенств, обрамленных разделительными символами:  $C_1 = \langle \text{алгебраическое выражение } C_{11} \rangle$  (разделитель)  $C_2 = \langle \text{алгебраическое выражение } C_{21} \rangle$  (разделитель) ...

При вычислении значений логических выражений старшинство операций устанавливается последовательностью их выполнения: скобированные операции — отрицание — конъюнкция — дизъюнкция.

Применение аппарата четкого логического следования обеспечивает выполнение операций фаз-

зификации значений входных переменных на интервалах времени проведения оперативного контроля  $X[i, \tau] = \{x_i[\tau]\}$ , измеренных для моментов времени начала контроля  $\tau$ . Фаззификация в рассматриваемом тематическом приложении решает следующие задачи:

- для текущего значения переменной каждого типа  $x_i[\tau]$  с помощью трех правил продукции  $PR_r$  определяется терм  $T_{x_i}(x_i)$ , соответствующий фактическому размещению значения в одном из нечетких множеств выделенных интервалов:

$$N_{r1}: \text{if } x_i[t] \in (X_{i \text{ нп н}}, X_{i \text{ нп в}}) \text{ then } T_{x_i}(x_i) = T_{\text{нп}}(x_i) \text{ or}$$

$$N_{r2}: \text{if } x_i[t] \in (X_{i \text{ др н}}, X_{i \text{ др в}}) \text{ then } T_{x_i}(x_i) = T_{\text{др}}(x_i) \text{ or}$$

$$N_{r3}: \text{if } x_i[t] \in (X_{i \text{ вп н}}, X_{i \text{ вп в}}) \text{ then } T_{x_i}(x_i) = T_{\text{вп}}(x_i);$$

- для значения термина  $T_{x_i}(x_i)$ , соответствующего фактическому размещению значения переменной  $x_i[\tau]$  в нечетких множествах выделенных интервалов, с помощью трех правил продукции  $PR_{r+1}$  определяется функция  $W_{x_i}(x_i)$  принадлежности к соответствующему нечеткому множеству и с помощью безусловного правила находится фаззифицирующее значение  $W_{x_i\tau}$ :

$$N_{r+1, 1}: \text{if } T_{x_i}(x_i) = T_{\text{нп}}(x_i) \text{ then } W_{x_i}(x_i) = W_{\text{нп}}(x_i)$$

$$\text{or } N_{r+1, 2}: \text{if } T_{x_i}(x_i) = T_{\text{др}}(x_i) \text{ then } W_{x_i}(x_i) = W_{\text{др}}(x_i)$$

$$\text{or } N_{r+1, 3}: \text{if } T_{x_i}(x_i) = T_{\text{вп}}(x_i) \text{ then } W_{x_i}(x_i) = W_{\text{вп}}(x_i);$$

$$N_{r+1, 4}: x_i = x_i[\tau]; W_{x_i\tau} = W_{x_i}(x_i).$$

В теории нечеткого логического следования основу антецедентных частей некоторого  $s$ -го правила  $r$ -й продукции  $PR_s$  составляют лингвистические формулы следующего вида:

$$\text{Ant}_{rs} = \langle X_{rs 1} \text{ есть (is) } T_{rs a} \in \{T_{\text{тм } rs 1}\} \rangle$$

(логическая операция)

$$\langle X_{rs 2} \text{ есть (is) } T_{rs b} \in \{T_{\text{тм } rs 2}\} \rangle$$

(логическая операция)

$$\langle X_{rs m} \text{ есть (is) } T_{rs q} \in \{T_{\text{тм } rs m}\} \rangle$$

(логическая операция),

где переменные  $X_{rs 1}$ ,  $X_{rs 2}$ , ...,  $X_{rs m}$  имеют статус входных лингвистических переменных;  $T_{rs a}$ ,  $T_{rs b}$ , ...,  $T_{rs q}$  — термы из состава терм-множеств [5, 7]. Одна из приведенных конструкций

$$\langle X_{rs i} \text{ есть (is) } T_{rs i} \in \{T_{\text{тм } rs i}\} \rangle,$$

соединяемая с другими аналогичными конструкциями с помощью логических операций, соответствует самостоятельному подусловию антецедентной части правила. Эта часть правила может включать  $m$  подусловий.

Если  $M(T_{\text{тм } rs i})$  — число термов, применяемых в  $i$ -м терм-множестве  $T_{\text{тм } rs i}$ , то при использовании в правилах  $m$  подусловий общее число продукционных правил  $M(PR_s)$  продукций с различными ва-

риантами антецедентных частей определяется следующим выражением:

$$M(PR_s) = M(T_{TM\ rs\ 1}) \times M(T_{TM\ rs\ 2}) \times \dots \times M(T_{TM\ rs\ m}).$$

Уровень истинности  $W_{Ant}(r, s)$  любой антецедентной части  $Ant_{rs}$  одного  $r$ -го правила  $s$ -й продукции определяется процедурой построения значения логического агрегата из отдельных значений функций принадлежности  $W_{x_i\tau}$  фаззифицированных входных переменных. Он вычисляется по схемам агрегирования нечеткой логики с учетом скобирования, установленного порядка выполнения логических операций и объединения результатов. При этом применяется технология отбора в качестве результата максимального значения из совокупности значений представленных функций принадлежности [5, 7]:

$$W_A \vee_{rs, i} = \max\{W_{x_i\tau}\}, i = a \geq 1, b, c, \dots, k \leq m.$$

Последний прием используется и при объединении результатов выполнения отдельных совокупностей многоместных операций конъюнкции подусловий на непересекающихся интервалах значений  $i$  в целях оценки уровня истинности  $W_{Ant}(r, s)$  всей антецедентной части  $r$ -го правила  $s$ -й продукции логического следования:

$$W_{Ant}(r, s) = \max\{W_{A \& rs, i}\}.$$

Консеквентная часть правила нечеткого логического следования образуется с помощью конструкций следующего вида:

$$\langle Y_{rs} \text{ есть (is) } Y_{rs} \in \{Y_{TM\ rs}\} \rangle, \langle Z_{rs} \text{ есть (is) } Z_{rs} \in \{Z_{TM\ rs}\} \rangle,$$

где переменные  $Y, Z$  имеют статус, соответственно, выходной и внутренней лингвистических переменных. Совокупности всех возможных словесных значений указанных лингвистических переменных образуют терм-множества выходных  $\{Y_{TM\ rs}\}$  и терм-множества внутренних  $\{Z_{TM\ rs}\}$  переменных, при этом их значениями являются подвыводы (подзаключения). В частных случаях указанные терм-множества могут содержать лишь по одному терму, каждый из которых будет непосредственно соответствовать некоторому выводу (заключению).

Для консеквентной части правила нечеткого вывода уровень истинности определяется значением синтезированных девятиточечных функций принадлежности выходной или внутренней переменных к соответствующим нечетким множествам:

$$W_{Cons}(r, s) = W_{y_j}(y_j) \text{ или } W_{Cons}(r, s) = W_{z_k}(z_k).$$

Это позволяет активизировать рассматриваемый подвывод (подзаключение) и оценить уровень истинности нечеткого логического следования  $W_{нчлс}(r, s)$ , который вытекает из одного  $r$ -го правила  $s$ -й продукции:

$$W_{нчлс}(r, s) = F_{rs} \bullet \min\{W_{Ant}(r, s); W_{Cons}(r, s)\}.$$

Если значение весового коэффициента  $F_{ki}$  не задано, то по умолчанию принимается  $F_{ki} = 1$ .

В ряде случаев антецедентные группы различных правил логических следований могут определять один и тот же по смыслу вывод или заключение продукции. В этом случае требуется аккумуляция всех возможных вариантов получения этого вывода (заключения):

$$W_{нчлс\ y}[Y_{rs}] = \\ = \max\{W_{нчлс}(r, s) \text{ для правил с общим термом } Y_{rs}\};$$

$$W_{нчлс\ z}[Z_{rs}] = \\ = \max\{W_{нчлс}(r, s) \text{ для правил с общим термом } Z_{rs}\}.$$

При выполнении данной операции принимаются во внимание результаты активизации  $W_{нчлс}(r, s)$  для всех подвыводов, которые учитываются при формировании рассматриваемого вывода (заключения).

Проведение скаляризации (дефаззификации) формируемого вывода (заключения) выполняется путем расчета центра тяжести требуемого нечеткого множества и позволяет найти прогнозируемые значения результативных выходных и внутренних переменных, которые могут быть приняты в качестве эталонов в операциях оперативного функционального контроля:

$$y_j M = \{y_0 x^{W_{нчлс\ y}[y_0]} + \dots + y_8 x^{W_{нчлс\ y}[y_8]}\} \times \\ \times \{y_0 + \dots + y_8\}^{-1};$$

$$z_k M = \{z_0 x^{W_{нчлс\ z}[z_0]} + \dots + z_8 x^{W_{нчлс\ z}[z_8]}\} \times \\ \times \{z_0 + \dots + z_8\}^{-1}.$$

Для текущих значений переменных каждого типа  $y_j[\tau], z_k[\tau]$  с помощью продукционных правил выполняется определение термов  $T_{y_j}(y_j), T_{z_k}(z_k)$ , соответствующих фактическому размещению значений в одном из нечетких множеств выделенных интервалов. Это принципиально позволяет сопоставить прогнозируемые и фактические значения результативных параметров и оценить их непротиворечивость на основе принятых экспертами допустимых отклонений. При этом продукции и правила образуют продукционную часть базы знаний.

### Заключение

Рациональное сочетание эмпирических, статистических, алгоритмических и эвристических приемов отображения входных, выходных и внутренних параметров исследуемой системы обеспечивает создание модели для оперативной выработки совокупностей системных эталонов на каждом наборе значений входных переменных. Это позволяет организовать функциональный контроль многопараметрических систем в масштабе времени системных процессов с сохранением необходимого режима функционирования контролируемой системы в контурах управления.

Предложенные принципы и схема выработки системных эталонов в практической реализации модели оперативного функционального контроля

сложных многопараметрических систем характеризуются наличием совокупности быстрых логических операций. При этом придание определенным функциям и процедурам технологического статуса существенно сокращает вычислительную сложность программной реализации разработанной интеллектуальной модели контроля систем.

Предложенная интеллектуальная технология позволяет организовать распараллеливание вычислительных процессов по различным входным переменным системы и применять при создании специализированных интеллектуальных средств оперативного контроля стандартные элементы нейронных сетей. В то же время создаются предпосылки для расширения функциональных возможностей интеллектуальных компонентов за счет комплексного использования результатов различных системотехнических

экспериментальных исследований, экспертных оценок и алгоритмических приемов.

#### Список литературы

1. **Основы** технической диагностики / Под ред. П. П. Пахоменко. М.: Энергия, 1976. 464 с.
2. **Гурман В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2004. 479 с.
3. **Дрейп Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. М.: Диалектика, 2007. 912 с.
4. **Купер К.** Индивидуальные различия. М.: Аспект — Пресс, 2000. 527 с.
5. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
6. **Борисов В. В., Федулов А. С., Зернов М. М.** Основы нечеткой арифметики. М.: Горячая линия — Телеком, 2014. 98 с.
7. **Штовба С. Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия — Телеком, 2007. 288 с.

## Intelligent Technologies for an Operative Functional Control of the Multivariable Systems

**A. V. Gulay**, is@bntu.by✉, **V. M. Zaitsev**, is@bntu.by,  
Belarus National Technical University, Belarus, 220013, Minsk

Corresponding author: **Gulay Anatoly V.**, Associate Professor, Chief of Department, Belarus National Technical University, Belarus, 220013, Minsk, e-mail: is@bntu.by

Received on March 23, 2017

Accepted on April 07, 2017

*Principles of organization of the operative functional control for a complex multivariable system were proposed with retention of its operation process in the control circuits. For the use of the real values of the system in the control checks and for an operative formation of the system templates a high-speed system model was constructed for operation in the time scale of the system processes. The model combines the empiric, statistical, algorithmic and heuristic devices for imaging of the system parameters and links between them. Implementation of the proposed model presupposes establishment of the specialized components of the system for its intelligent control with the use of the processors. The model construction is based on performance of the preliminary empiric studies and use of the results of the technological regression analysis of the system in organization of the operative control based on the fuzzy logic instrument and fuzzy conclusions. The input, output and internal parameters of the studied system were conferred, the status of the linguistic variables, and possible intervals of the real values of the input system variables were set in an expert way, as well as the functions of their belonging. This makes it possible for every set of the input parameters to operatively build the functions of their belonging of the effective output and internal variables to the required fuzzy sets with the aid of the beta coefficients, fuzzy arithmetic operations and maximal generalization. The use of the fuzzy production rule, provision of conclusions (summaries) at the current values of the input parameters ensures forecasting of a possible location of the input and output variables of the system in the fuzzy sets, which correspond to the preliminarily allocated intervals of the values. Being so, a range of the operative effective output and internal parameters is formed in the controlled multivariable system. The use of the offered model of the operative functional control ensures a collation of the forecasted and real values of the effective parameters of the complex multivariable system and assessment of their non-contradiction.*

**Keywords:** multivariable systems, functional control, intelligent technologies, fuzzy sets, regression models

For citation:

**Gulay A. V., Zaitsev V. M.** Intelligent Technologies for an Operative Functional Control of the Multivariable Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 670–678.

DOI: 10.17587/mau.18.670-678

#### References

1. **Пахоменко П. П.** ed. *Osnovy' texnicheskoj diagnostiki* (Basics of technical diagnostics), Moscow, E'nergiya, 1976, 464 p. (in Russian).
2. **Гурман В. Е.** *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika* (Theory of Probability and Mathematical Statistics), Moscow, Vy'sshaya shkola, 2004, 479 p. (in Russian).

3. **Дрейп Н., Смит Г.** *Prikladnoj regressionny'j analiz. Mnozhestvennaya regressiya* (Applied regression analysis. Multiple Regression), Moscow, Dialektika, 2007, 912 p. (in Russian).
4. **Купер К.** *Individual'ny'e razlichiya* (Individual differences), Moscow, Aspekt — Press, 2000, 527 p. (in Russian).
5. **Заде Л.** *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoj i ee primeneniye k prinyatiyu priblizhenny'x reshenij* (The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions), Moscow, Mir, 1976, 165 p. (in Russian).
6. **Борисов В. В., Федулов А. С., Зернов М. М.** *Osnovy' nechetkoj arifmetiki* (The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions), Moscow, Goryachaya liniya — Telekom, 2014, 98 p. (in Russian).
7. **Штовба С. Д.** *Proektirovanie nechetkix sistem sredstvami MATLAB* (Designing fuzzy systems using MATLAB), Moscow, Goryachaya liniya — Telekom, 2007, 288 p. (in Russian).

Л. А. Климина, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., klimina@imec.msu.ru,  
 Е. С. Шалимова, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., ekateryna-shalimova@yandex.ru,  
 НИИ механики МГУ, Москва

## Двухпропеллерная ветроэнергетическая установка с дифференциальной планетарной передачей\*

Рассматривается математическая модель двухпропеллерной горизонтально-осевой ветроэнергетической установки (ВЭУ). Определяется значение внешнего сопротивления в цепи электрогенератора, при котором механическая мощность установки близка к максимальной. Описываются рабочие режимы ВЭУ, которые могут быть реализованы при таком внешнем сопротивлении. Строится стратегия управления, позволяющая перевести систему в рабочий режим, характеризующийся значением мощности, близким к максимальному. Используется два типа управляющего воздействия: изменение внешнего сопротивления, применение тормоза для остановки любого из колес ДПП.

**Ключевые слова:** двухпропеллерная ветроэнергетическая установка, дифференциальная планетарная передача, замкнутая динамическая модель, установившиеся режимы, устойчивость, механическая мощность, управление

### Обозначения

$Oz$  — ось вращения обоих пропеллеров, всех колес дифференциальной планетарной передачи (ДПП) и ротора генератора;

$\omega_c, \omega_s, \omega_r, \omega_p$  — угловые скорости водила (каре́тки), солнечного колеса, внешнего колеса, каждой из планет ДПП, соответственно ( $\omega_s r_s = 2\omega_c r_c - \omega_r r_r$ );

$r_c, r_s, r_r, r_p$  — радиусы соответствующих колес ДПП ( $r_c = r_s - r_p, r_r = r_c + 2r_p$ );

$J_c, J_s, J_r, J_p$  — центральные моменты инерции твердых тел "основной пропеллер + водило", "дополнительный пропеллер + внешнее колесо", "солнечное колесо + ротор генератора", планета;

$m_p$  — масса каждой из планет;

$\rho$  — плотность воздуха;

$S$  — характерная площадь каждого из пропеллеров;

$b$  — радиус основного (переднего) пропеллера;

$d$  — радиус дополнительного (заднего) пропеллера;

$a, k$  — безразмерные геометрические параметры;

$A_1, A_2, A_3, J$  — безразмерные инерционные параметры;

$\tau = \eta l/b$  — безразмерное время;

$(\cdot)'$  — производная по безразмерному времени  $\tau$ ;

$\lambda$  — быстроходность основного пропеллера;

$\eta$  — быстроходность дополнительного пропеллера;

$f_c(\lambda), f_r(\eta)$  — безразмерные функции аэродинамических моментов, действующих на основной и дополнительный пропеллеры;

$\mu$  — безразмерная угловая скорость ротора генератора;

$c$  — коэффициент электромеханического взаимодействия;

$p$  — безразмерный коэффициент электромеханического взаимодействия;

$r$  — внутреннее сопротивление генератора;

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ: гранты NN 15-01-06970, 16-31-00374, 17-08-01366.

$T_c, T_r$  — аэродинамические моменты, действующие на основной и дополнительный пропеллеры (относительно оси  $Oz$ );

$T_s$  — электромеханический момент, действующий на ротор генератора (относительно оси  $Oz$ ).

### Введение

Эффективность горизонтально-осевых ветроэнергетических установок (ВЭУ) с двумя пропеллерами, вращающимися в противоположных направлениях, подтверждена экспериментальными исследованиями и результатами математического моделирования на основе хорошо разработанных моделей аэродинамики турбин [1–4]. Однако в большинстве работ не обсуждается влияние изменения электрической нагрузки в цепи генератора ВЭУ на динамику установки. В то же время анализ соответствующих эффектов весьма актуален для описания функционирования так называемых малогабаритных ВЭУ, т. е. ветроустановок, обеспечивающих работу локальной электросети. В таких сетях (характерных, например, для индивидуальных домашних хозяйств) подключение/отключение дополнительных потребителей существенно сказывается на режиме работы ВЭУ. В частности, имеет место гистерезис механической мощности ВЭУ на рабочем режиме в зависимости от увеличения/уменьшения электрической нагрузки, характеризующейся внешним сопротивлением в локальной цепи генератора ВЭУ. Для классической (однопропеллерной) горизонтально-осевой ВЭУ эффект гистерезиса описан на основе математического моделирования [5, 6].

В данной работе построим замкнутую математическую модель динамики малогабаритной двухпропеллерной ВЭУ. Будем считать, что генератор ВЭУ подключен к локальной электрической цепи. Внешнее сопротивление в цепи генератора будем считать варьируемым параметром модели.

Будем рассматривать ВЭУ, в конструкцию которой входит дифференциальная планетарная передача (ДПП). Каждый пропеллер жестко соединен с одним из колес ДПП, ротор генератора жестко соединен с третьим колесом ДПП. Динамика такой системы существенно отличается от динамики двухпропеллерной ВЭУ, не оснащенной ДПП (когда ротор генератора установлен на оси одного пропеллера, а статор — на оси другого пропеллера). Отметим, что угловая скорость ротора генератора относительно статора при наличии ДПП может быть значительно выше, чем угловая скорость одного пропеллера относительно другого. Другое преимущество ДПП состоит в дополнительных возможностях для управления системой. Некоторые примеры возможностей управления однопропеллерной ВЭУ с ДПП описаны в работе [7], они существенно отличаются от вариантов управления, предлагаемых в данной работе для двухпропеллерной ВЭУ.

### Постановка задачи

#### Описание механической системы

Рассматриваемая механическая система включает в себя два пропеллера: основной пропеллер жестко соединен с водилом ДПП, дополнительный пропеллер жестко соединен с внешним колесом ДПП (рис. 1). Предполагается, что первый пропеллер дает основной вклад в формирование крутящего момента на программном рабочем режиме (на больших оборотах), в то время как дополнительный пропеллер играет ведущую роль на стартовом этапе (создает хороший момент при низкой угловой скорости).

Ротор генератора ВЭУ жестко соединен с солнечным колесом ДПП. Генератор подключен к электрической цепи с переменным внешним сопротивлением  $R$ .

#### Модель внешних сил

Предположим, что на пропеллеры набегаёт поток со скоростью  $V$ , направленный противоположно оси  $Oz$  (падение скорости потока за первым про-

пеллером будем учитывать посредством функции  $f_r(\eta)$  безразмерного аэродинамического момента, действующего на второй пропеллер, а не посредством изменения модуля скорости потока). Используем квазистационарную модель аэродинамического воздействия для определения аэродинамических моментов  $T_c$ ,  $T_r$ . Для определения электромеханического момента  $T_s$ , действующего на ротор генератора, используем модель линейной зависимости электромеханического момента от угловой скорости ротора (аналогично работам [5–7]). Получаем следующие выражения:

$$\begin{aligned} T_c &= 0,5\rho S b V^2 f_c(\lambda), \text{ где } \lambda = b\omega_c V^{-1}; \\ T_r &= 0,5\rho S b V^2 f_r(\eta), \text{ где } \eta = b\omega_r V^{-1}; \\ T_s &= -c^2 \omega_s (R + r)^1. \end{aligned} \quad (1)$$

Функции  $f_c(\lambda)$ ,  $f_r(\eta)$  существенно нелинейны. Далее мы используем характерные примеры этих функций, представленные на рис. 2. Конкретные примеры функций  $f_c(\lambda)$ ,  $f_r(\eta)$  выбраны здесь для иллюстрации. Дальнейшие рассуждения справедливы для широкого класса функций аэродинамического момента.

Для основного пропеллера произведение  $\omega_c T_c$  положительно при  $\lambda \in (0, \lambda_1)$  и при  $\lambda \in (\lambda_2, \lambda_3)$ . Для дополнительного пропеллера произведение  $\omega_r T_r$  положительно при  $\eta \in (\eta_1, 0)$ . Максимальная абсолютная величина аэродинамического момента у основного пропеллера больше, чем у дополнительного. Однако в отсутствие дополнительного пропеллера (или разгонного устройства) основной пропеллер сам не разгоняется до высоких значений быстроходности, если его начальная угловая скорость близка к нулю (ввиду наличия диапазона значений быстроходности, в котором момент отрицателен). Вместе с тем, если бы отсутствовал основной пропеллер, дополнительный в одиночку не мог бы создать настолько же большой по абсолютной величине крутящий момент, как у основного пропеллера.

Рабочие режимы с отрицательными значениями  $\omega_c$ , как и с положительными значениями  $\omega_r$ , не являются желательными, однако могут наблюдаться при относительно высоких значениях момента  $T_s$ .

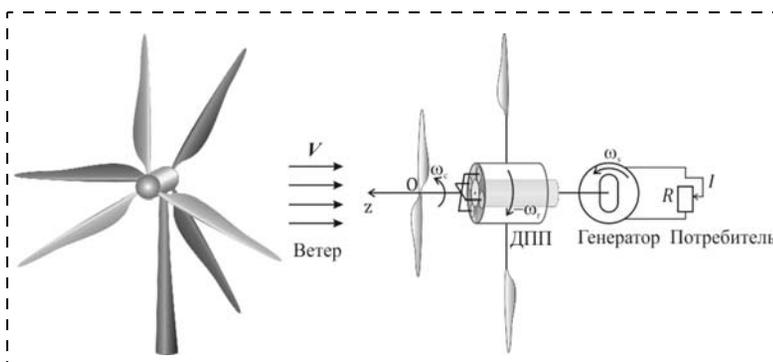


Рис. 1. Общий вид и схема двухпропеллерной ВЭУ с ДПП

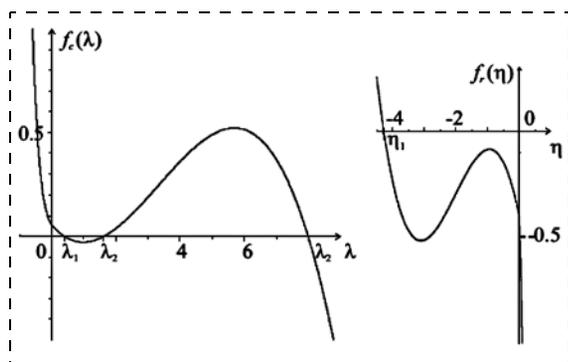


Рис. 2. Безразмерные функции аэродинамических моментов (в одинаковом масштабе)

электрической нагрузки. Чтобы по возможности избежать возникновения таких режимов, зададим функции  $f_c(\lambda)$ ,  $f_r(\eta)$  так, чтобы их абсолютные значения быстро возрастали при возрастании абсолютного значения  $\lambda$  в случае отрицательных  $\lambda$  и при возрастании  $\eta$  в случае положительных  $\eta$ , соответственно.

Далее для упрощения задачи предполагаем  $b = d$ .

### Модель динамики системы

Предположим, что отсутствует проскальзывание между элементами ДПП. Тогда рассматриваемая механическая система имеет две степени свободы. С учетом выражений (1) безразмерные уравнения движения системы имеют вид:

$$\begin{cases} \lambda' = a(A_2 + A_3)f_c(\lambda) + kA_3f_r(\eta) - \\ - pa^{-1}A_2\lambda + pk^{-1}A_2\eta; \\ \eta' = kA_3f_c(\lambda) + k^2(a^{-1}A_3 + A_1)f_r(\eta) + \\ + pka^{-1}A_1\lambda - pA_1\eta. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь

$$p = \frac{c^2}{2(R+r)\rho S b^2 V} - \text{безразмерный коэффициент внешней нагрузки};$$

$$a = \frac{r_s}{4r_c}, k = \frac{a}{1-2a}, A_1, A_2, A_3, J - \text{безразмерные}$$

положительные константы, отвечающие за геометрические и инерционные свойства системы:

$$A_1 = \frac{r_c}{Jr_s} \rho S b^3 \left( \frac{r_r r_p}{2r_c r_s} J_c + \frac{2r_c r_r r_p}{r_s} m_p - \frac{2r_c r_r}{r_s r_p} J_p \right);$$

$$A_2 = \frac{r_c}{Jr_s} \rho S b^3 \left( \frac{r_p}{2r_r} J_r + \frac{r_r}{r_p} J_p \right);$$

$$A_3 = \frac{r_c}{Jr_s} \rho S b^3 \left( \frac{r_r r_p}{2r_s^2} \right) J_s + \frac{r_r}{r_p} J_p);$$

$$\begin{aligned} J = & \frac{r_p r_r J_c J_s}{4r_s^2} + \frac{r_p J_c J_r}{4r_r} + \frac{r_c^2 r_p J_s J_r}{r_s^2 r_r} + \frac{r_r J_c J_p}{r_p} + \\ & + \frac{r_c^2 r_r J_s J_p}{r_s^2 r_p} + \frac{r_c^2 J_r J_p}{r_r r_p} + \frac{r_c^2 r_r J_s m_p r_p^2}{r_s^2 r_p} + \\ & + \frac{r_c^2 J_r m_p r_p^2}{r_r r_p} + \frac{4r_c^2 r_r J_p m_p r_p^2}{r_p^3}. \end{aligned}$$

Устойчивые неподвижные точки системы (2) соответствуют рабочим режимам ВЭУ. Характеристики неподвижных точек и, соответственно, рабочих режимов, естественно зависят от параметров модели, в частности от параметра  $p$ , значение которого в процессе работы ВЭУ может изменяться как за счет изменения скорости ветра, так и за

счет изменения внешнего сопротивления в цепи генератора (так, если цепь разомкнута,  $p$  равен нулю). Остальные параметры модели для конкретной ВЭУ не изменяются.

Задача состоит в описании рабочих режимов и построении управления, позволяющего перевести систему на рабочий режим, характеризующийся максимальным значением механической мощности.

### Рабочие режимы

Неподвижная точка  $\{\lambda^*, \eta^*\}$  системы (2) удовлетворяет следующим уравнениям:

$$\begin{cases} \lambda' = a(A_2 + A_3)f_c(\lambda^*) + kA_3f_r(\eta^*) - \\ - pa^{-1}A_2\lambda^* + pk^{-1}A_2\eta^* = 0; \\ \eta' = kA_3f_c(\lambda^*) + k^2(a^{-1}A_3 + A_1)f_r(\eta^*) + \\ + pka^{-1}A_1\lambda^* - pA_1\eta^* = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Уравнения (3) определяют на плоскости  $\{\lambda, \eta\}$  две кривые:  $\lambda' = 0$  и  $\eta' = 0$ . Эти кривые разбивают плоскость  $\{\lambda, \eta\}$  на области, внутри которых  $\lambda'$  и  $\eta'$  определены. Таким образом, внутри каждой области известно направление траекторий  $(\lambda(\tau), \eta(\tau))$ . Построение на плоскости  $\{\lambda, \eta\}$  кривых (3) позволяет найти неподвижные точки системы (2), и более того, оказывается, что расположение этих кривых таково, что направления фазовых скоростей в указанных областях позволяют сделать выводы об устойчивости/неустойчивости неподвижных точек.

Пример анализа направлений фазовых траекторий представлен на рис. 3. Кривая "1" соответствует уравнению  $\{\lambda' = 0\}$ , кривая "2" — уравнению  $\{\eta' = 0\}$ ; стрелками качественно показаны направления траекторий в соответствующих областях; закрашенные кружки соответствуют притягивающим стационарным движениям, белые кружки — отталкивающим стационарным движениям. Кривые  $\{\lambda' = 0\}$ ,  $\{\eta' = 0\}$ , представленные на рис. 3, получены численно при следующих значениях параметров сис-

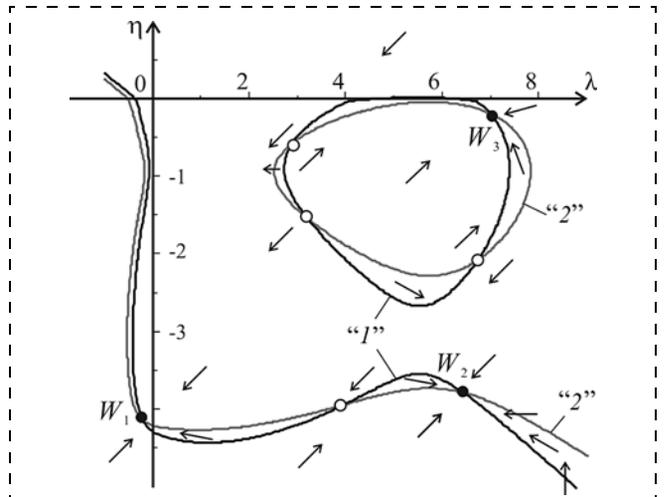


Рис. 3. Пример расположения неподвижных точек и распределения фазовых скоростей на плоскости  $\{\lambda, \eta\}$  при  $p = p^*$

темы:  $a = 0,125$ ,  $A_1 = 3,7$ ,  $A_2 = 2,8$ ,  $A_3 = 3,4$  и  $p = p^* = 0,0008$ .

В примере, проиллюстрированном на рис. 3, система (2) обладает тремя устойчивыми неподвижными точками:  $W_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

### Стратегия выбора коэффициента передачи

Уравнения (3) можно привести к следующему виду:

$$\begin{cases} f_r(\eta^*) = -(1 - 2a)f_c(\lambda^*); \\ p(\lambda^* - (1 - 2a)\eta^*) = a^2 f_c(\lambda^*). \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, каждому значению  $\lambda^*$  отвечают одно, два (в вырожденном случае) или три значения  $\eta^*$  (по числу корней соответствующего уравнения  $f_r(\eta^*) = \text{const}$ ), которые реализуются при различных  $p$ . Каждой паре  $(\lambda^*, \eta^*(\lambda^*))$  при  $\lambda^* \neq (1 - 2a)\eta^*$  отвечает ровно одно значение коэффициента  $p$  электромеханического взаимодействия, при котором существует стационарное движение с данными значениями быстроходности пропеллеров. При некотором значении  $a$  возможен случай  $\lambda^* = (1 - 2a)\eta^*$ ,  $f_c(\lambda^*) = 0$ , при котором солнечное колесо ДПП остается неподвижным ( $\mu^* = pa^{-1}(\lambda^* - (1 - 2a)\eta^*) = 0$ ) и, соответственно,  $p$  произвольно.

Отметим, что, введя новые обозначения, уравнения (4) можно представить в том же виде, который имеют уравнения стационарных движений двухпропеллерной ВЭУ без ДПП (когда ротор генератора закреплен на оси одного пропеллера, а статор — на оси другого):

$$\begin{cases} F_r(\zeta^*) = f_c(\lambda^*); \\ c = \frac{f_c(\lambda^*)}{\lambda^* - \zeta^*}. \end{cases}$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \zeta^* &= (1 - 2a)\eta^*, \\ F_r(\zeta^*) &= f_r(\eta^*)(1 - 2a)^{-1}, \\ c &= pa^{-2}. \end{aligned}$$

Итак, можно сказать, что наличие ДПП изменяет "эффективные" значения функций аэродинамического момента и коэффициента электромеханического взаимодействия по сравнению с ВЭУ без ДПП. Это существенно, когда функции  $\{f_c(\lambda), f_r(\eta)\}$ , описывающие аэродинамические характеристики пропеллеров, различны. В частности, при некотором значении  $a = a_{opt}$  коэффициента передачи может существовать установившееся движение, при котором каждый из пропеллеров имеет быстроходность  $\{\lambda_{opt}^*, \eta_{opt}^*\}$ , соответственно, отвечающую максимальному значению механической мощности. На таком режиме движения механическая мощность  $(\omega_c T_c + \omega_r T_r)$  двухпропеллерной ВЭУ будет максимальна.

Значение  $a_{opt}$  определяется следующей формулой:

$$a_{opt} = \frac{f_c(\lambda_{opt}^*) + f_r(\eta_{opt}^*)}{2f_c(\lambda_{opt}^*)},$$

$$\lambda_{opt}^* = \text{argmax}(\lambda f_c(\lambda)), \quad \eta_{opt}^* = \text{argmax}(\eta f_r(\eta)).$$

В частности, для ВЭУ с пропеллерами, характеристики которых представлены на рис. 2, получаем, что при  $a = 1/8$ :  $F_r(\zeta^*) \approx -f_c(\lambda^*)$ . Таким образом, при  $a = 0,125$  пропеллеры с заданными характеристиками могут совместно работать на таком режиме, на котором каждый из них вырабатывает механическую мощность, близкую к максимально возможной для него. Далее будем считать конфигурацию ДПП, соответствующую значению  $a = 0,125$ , близкой к оптимальной для данных (см. рис. 2) аэродинамических характеристик пропеллеров (с точки зрения максимизации механической мощности), и рассмотрим эту конфигурацию подробно.

При  $a = 0,125$  на режиме, отвечающем точке  $W_2 = \{\lambda^* = 6,4, \eta^* = -3,7\}$  (рис. 3), оба пропеллера вырабатывают механическую мощность, близкую к максимальной, которая для них возможна. Отметим, что в данном случае указанный режим устойчив. Будем считать предпочтительными (программным) режим, отвечающий точке  $W_2$ , и значение  $p = p^* = 0,0008$ , при котором он реализуется.

### Стратегия управления и обсуждение результатов

Ставится следующая задача: перевести систему из начального состояния  $\{\lambda = 0, \eta = 0\}$  в окрестность точки  $W_2$ , соответствующей программному рабочему режиму. Для классической ВЭУ с одним пропеллером задача выхода на рабочий режим с высоким значением мощности может быть решена путем отключения потребителей на этапе разгона турбины [5]. Потребителей следует подключить к сети ВЭУ после того, как достигнута достаточно высокая угловая скорость турбины (система находится в области притяжения высокоскоростного, а не низкоскоростного режима). Такой подход подразумевает, что функция аэродинамического момента турбины имеет качественный вид, подобный виду функции  $f_r$  (см. рис. 2), а именно: функция аэродинамического момента имеет только один корень, соответствующий большому значению быстроходности. Однако, если единственный пропеллер ВЭУ имеет аэродинамические характеристики, которые качественно соответствуют виду функции  $f_c$  (см. рис. 2), то чтобы перевести систему на высокоскоростные режимы, потребуется дополнительное разгоняющее устройство [6].

В случае рассматриваемой здесь двухпропеллерной ВЭУ предполагается, что дополнительный пропеллер может быть использован для того, чтобы разогнать основной пропеллер до высокой угловой скорости. Из рис. 3 видно, однако, что точка  $\{0, 0\}$  (начальное состояние) не принадлежит об-

ласти притяжения точки  $W_2$ , отвечающей программному режиму.

Опишем стратегию управления, позволяющую с помощью дополнительного пропеллера перевести систему на программный рабочий режим.

**Шаг 1.** Сделаем нулевым коэффициент внешней нагрузки  $p$ , т. е. отключим всех потребителей от электрогенератора ВЭУ. Этот шаг повторяет метод разгона однопропеллерной ВЭУ. Тогда система перейдет на стационарный режим с небольшим значением  $\lambda$  и относительно большим значением  $\eta$  (рис. 4). Отметим, что все параметры модели при построении рис. 3 и рис. 4 одинаковы, кроме параметра  $p$ . Таким образом, рис. 4 описывает свойства динамики той же ВЭУ в случае отсутствия внешней электрической нагрузки.

Начальная точка  $\{0, 0\}$  оказывается в области притяжения неподвижной точки  $W_{01}$  (в нашем примере она имеет координаты  $\{0,4, -4,3\}$ ). Следовательно, постепенно изображающая точка перейдет в сколь угодно малую окрестность точки  $W_{01}$ . Однако, если после этого мы просто изменим значение коэффициента электрической нагрузки на программное значение ( $p = p^*$ ), это не даст желаемого результата, поскольку точка  $W_{01}$  при  $p = p^*$  находится вне области притяжения программного положения  $W_2$  (она находится в области притяжения точки  $W_{01}$ ). В связи с этим требуется дополнительный (по сравнению с однопропеллерной турбиной) шаг стратегии управления.

**Шаг 2.** Пусть  $p = 0$  и пусть система находится в состоянии, отвечающем точке  $W_{01}$  (т. е. первый этап перехода завершен). Приложим к внешнему колесу ДПП тормозящий момент (остановим внешнее колесо с помощью тормоза). Предполагается, что с помощью тормоза возможно в произвольный момент достаточно быстро остановить любое из колес ДПП (и даже одновременно любые два колеса). Дополнительно предположим, что отношение момента инерции солнечного колеса к моменту инерции каретки достаточно велико, так что при остановке внешнего колеса угловая скорость  $\omega_s$  солнечного колеса в первый момент почти не изменяется, а угловая скорость  $\omega_c$  каретки меняется. Пренебрегая небольшими изменениями величины  $\omega_s$ , запишем кинематические связи до и после остановки внешнего колеса:

$$\begin{cases} \omega_{s01}r_s = 2\omega_{c01}r_c - \omega_{r01}r_r; \\ \omega_{s01}r_s = 2\omega_{c03}r_c. \end{cases} \quad (5)$$

Из уравнений (5) получаем, что угловая скорость каретки после остановки внешнего колеса станет равной  $\omega_{c03} = \omega_{c01} - 0,5\omega_{r01}\frac{r_r}{r_c}$ . В нашем случае  $\frac{r_r}{r_c} = 2$ .

Таким образом, получаем:  $\lambda_{03} = \lambda_{01} - \eta_{01} \approx 0,4 + 4,3 = 4,7$ . Отметим, что  $\lambda \approx 4,7$  относится к диапазону быстроходности, на котором аэродинамиче-

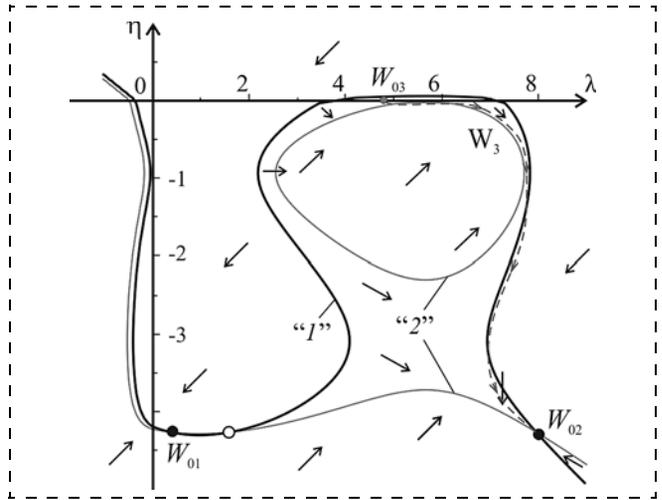


Рис. 4. Пример расположения неподвижных точек и распределения фазовых скоростей для случая  $p = 0$ . Штриховой линией показан пример траектории

ский момент, действующий на основной пропеллер, является разгоняющим, и при  $\eta = 0$  аэродинамический момент, действующий на дополнительный пропеллер, является разгоняющим (относительно желаемого направления вращения пропеллеров).

При  $p = 0$  точка  $W_{03} = \{\lambda_{03}; 0\} = \{4,7; 0\}$  находится в области притяжения точки  $W_{02} = \{8; -4,3\}$  (рис. 4). Итак, после перехода системы в состояние, отвечающее малой окрестности точки  $W_{03} = \{\lambda_{03}, 0\}$ , следует отключить тормоз, препятствующий вращению внешнего колеса ДПП. Тогда система постепенно перейдет из состояния, отвечающего точке  $W_{03}$ , в состояние, отвечающее малой окрестности точки  $W_{02}$  (штриховая кривая на рис. 4 иллюстрирует соответствующий переходный процесс).

**Шаг 3.** Итак, теперь состояние системы отвечает точке  $W_{02}$ . Подключим потребителей электроэнергии к локальной цепи генератора, т. е. перейдем к программному значению  $p = p^*$  от  $p = 0$ . При  $p = p^*$  точка  $W_{02}$  находится в области притяжения программной неподвижной точки  $W_2$ . Таким образом, задача управления выполнена.

Отметим, что для случая двухпропеллерной ветроустановки, не оснащенной ДПП, у которой ротор генератора установлен на оси одного пропеллера, а статор — на оси другого, задача разгона одного пропеллера с помощью другого не обладает подобным простым решением. В последнем случае отсутствует опция за счет искусственного торможения одной из осей преобразовать энергию вращения одного пропеллера в энергию противоположно направленного вращения второго.

Таким образом, подтверждается одно из преимуществ ДПП: наличие дополнительных возможностей управления для перехода на программный режим.

Рассмотрена замкнутая динамическая модель двухпропеллерной ВЭУ, оснащенной ДПП. Рабочие режимы ВЭУ исследованы для случая конкретной геометрической конфигурации системы, при которой может быть реализован рабочий режим с механической мощностью, близкой к максимальной. Такой режим выбран в качестве программного. Построена стратегия управления, позволяющая перевести систему на этот рабочий режим при условии, что в начальный момент угловые скорости обоих пропеллеров нулевые. Предложенное управление подразумевает выполнение следующих шагов: отключение/подключение потребителей, а также включение/выключение тормоза, останавливающего внешнее колесо ДПП.

1. Shen W. Z., Zakkam V. A. K., Sorensen J. N., Appa K. Analysis of counter-rotating wind turbines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2007. Vol. 75, Iss. 1, P. 9.
2. Farthing S. P. Robustly Optimal Contra-Rotating HAWT // *Wind engineering*. 2010. Vol. 34, Iss. 6. P. 733–742.
3. Lee S., Kim H., Son E., Lee S. Effects of design parameters on aerodynamic performance of a counter-rotating wind turbine // *Renewable Energy*. 2012. Vol. 42. P. 140–144.
4. Ozbay A., Tian W., Hu H. Experimental investigation on the wake characteristics and aeromechanics of dual-rotor wind turbines // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2016. Vol. 138, Iss. 4. P. 042602.
5. Досаев М. З., Самсонов В. А., Селюцкий Ю. Д. О динамике малой ветроэлектростанции // *Доклады Академии наук*. 2007. Т. 416, № 1. С. 50–53.
6. Досаев М. З., Линь Ч.-Х., Лю В.-Л., Самсонов В. А., Селюцкий Ю. Д. Качественный анализ стационарных режимов малых ветровых электростанций // *Прикладная математика и механика*. 2009. Т. 73, № 3. С. 368–374.
7. Климина Л. А., Голуб А. П. Регулирование рабочих режимов ВЭУ с помощью дифференциальной планетарной передачи // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 4. С. 24–32.

## Dual-Propeller Wind Turbine with a Differential Planetary Gear

L. A. Klimina, klimina@imec.msu.ru✉, E. S. Shalimova, ekateryna-shalimova@yandex.ru,  
Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russian Federation

Corresponding author: Klimina Ljubov A., Ph. D., Senior Scientific Researcher,  
Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russian Federation,  
e-mail: klimina@imec.msu.ru

Received on March 24, 2017

Accepted on April 14, 2017

The topic of the article is construction and study of the closed mathematical model of a dual-propeller horizontal axis wind turbine (HAWT). One propeller is rigidly connected to the carrier of a differential planetary gear (DPG), the other propeller is rigidly joined to the external gear of the DPG, the rotor of the generator is rigidly joined to the sun gear. The generator is connected to a local electric circuit. The external resistance in the circuit is a varied parameter of the model. The aerodynamic forces acting upon the propellers are modeled using a quasi-steady approach. The electromagnetic torque acting upon the rotor of the generator is supposed to be a linear function of the angular speed of this rotor. Equations of the steady motions of a HAWT are derived. The optimal value of a gear ratio is calculated depending on the aerodynamic characteristics of the propellers. The external resistance, for which the mechanical power of the turbine is close to its maximum, is found. The operating modes for this external resistance and their domains of attraction are described. A possibility of acceleration of one propeller by means of the other propeller is discussed. The control strategy, which transfers the system to the program operating mode, is constructed. Two types of control are used: variation of the external resistance in the local circuit of the generator and application of a brake to one of the rings of the DPG.

**Keywords:** dual-rotor wind turbine, differential planetary gear, closed dynamical model, steady motions, stability, mechanical power, control

**Acknowledgements:** This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects NN 15-01-06970, 16-31-00374, 17-08-01366.

For citation:

Klimina L. A., Shalimova E. S. Dual-Propeller Wind Turbine with a Differential Planetary Gear, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 679–684.

DOI: 10.17587/mau.18.679-684

### References

1. Shen W. Z., Zakkam V. A. K., Sorensen J. N., Appa K. Analysis of counter-rotating wind turbines, *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, vol. 75, no. 1, p. 9.
2. Farthing S. P. Robustly Optimal Contra-Rotating HAWT, *Wind engineering*. 2010, vol. 34, no. 6, pp. 733–742.

3. Lee S., Kim H., Son E., Lee S. Effects of design parameters on aerodynamic performance of a counter-rotating wind turbine, *Renewable Energy*, 2012, vol. 42, pp. 140–144.
4. Ozbay A., Tian W., Hu H. Experimental investigation on the wake characteristics and aeromechanics of dual-rotor wind turbines, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, vol. 138, no. 4, pp. 042602.
5. Dosaev M. Z., Samsonov V. A., Seliutski Y. D. On the dynamics of a small-scale wind power generator, *Doklady Physics*, 2007, vol. 52, no. 9, pp. 493–495 (in Russian).
6. Dosaev M. Z., Lin Ch.-H., Lu W.-L., Samsonov V. A., Seliutskii Yu. D. A qualitative analysis of the steady modes of operation of small wind power generators, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2009, vol. 73, no. 3, pp. 259–263 (in Russian).
7. Holub A. P., Klimina L. A. Control of operation modes of a wind power station by differential planet gear, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 4, pp. 24–32 (in Russian).

Ю. И. Еременко, д-р техн. наук, проф., erem49@mail.ru,

А. И. Глуценко, канд. техн. наук, доц., strondutt@mail.ru, В. А. Петров, аспирант, 79040882508@ya.ru,  
Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал)

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования  
"Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", г. Старый Оскол

## Об использовании нейросетевого настройщика для адаптации П регулятора скорости электропривода прокатной клетки\*

*Рассмотрена проблема построения адаптивной системы управления электроприводом прокатной клетки. В качестве механизма адаптации для оперативного изменения настройки регулятора скорости применен нейросетевой настройщик, состоящий из искусственной нейронной сети и базы правил. Проведено сравнительное моделирование системы с классическим пропорциональным регулятором и системы с настройщиком. Показана эффективность предлагаемого метода.*

**Ключевые слова:** электропривод высокой мощности, подчиненное регулирование, прокатная клетка, П-регулятор, адаптация регулятора, нейронная сеть, база правил, нейросетевой настройщик

### Введение

Прокатное производство является одной из наиболее энергоемких составляющих горно-металлургического комплекса [1]. Прокатные клетки, в особенности те, которые осуществляют черновую прокатку заготовок, оснащаются электрическими машинами высокой мощности. В настоящее время в отечественной промышленности в качестве двигателей главных приводов черновых клеток широко используются двигатели постоянного тока.

Для построения системы управления подобным электроприводом применяется известный принцип подчиненного регулирования координат [2]. По этому принципу для регулирования частоты вращения электродвигателя в первой зоне (ниже номинальной скорости) строятся два контура управления. Внутренний — контур регулирования тока якоря электрической машины, внешний — контур регулирования скорости. В этих контурах используются регуляторы П и ПИ типов, настраиваемые на технический и (или) симметричный оптимумы. Такая настройка позволяет с относительно хорошим качеством регулирования управлять электроприводом постоянного тока. Однако сложные металлургические агрегаты, в том числе и прокатные клетки, являются нелинейными объектами управления. Это приводит к ухудшению качества переходных процессов при дрейфе их параметров. Этот дрейф возникает, в первую очередь, из-за технологии реверсивной прокатки, которая часто применяется в работе черновых прокатных клеток. Она заключается в том, что прокатываемая заготовка несколько раз проходит сквозь прокатные валки, изменяя свои геометрические размеры. Кроме того, прокатываемые заготовки могут отличаться по температуре и маркам стали и, соответ-

ственно, механическим характеристикам. Также технологией предусмотрены замены изношенных прокатных валков, что приводит к изменению момента инерции электропривода.

Таким образом, используемые линейные П и ПИ регуляторы не всегда способны обеспечить требуемое качество управления электроприводом прокатной клетки в условиях изменения параметров объекта управления.

Решением данной проблемы может стать построение адаптивной системы управления. При построении такой системы, в первую очередь, необходимо выбрать используемый закон управления. Подавляющее большинство электроприводов на производстве функционирует с использованием П/ПИ регуляторов. Кроме того, считается [3], что для уже существующей системы под управлением регуляторов, основанных на ПИД алгоритме, нет необходимости усложнять систему, заменяя этот алгоритм другим, а функции адаптации следует перенести на механизм, изменяющий настройку вышеуказанных регуляторов в режиме реального времени (настройщик). Рассмотрим подобные системы подробнее.

Термин "настройщик" был введен в 1975 г. коллективом авторов, под руководством Б. В. Новоселова [4]. Подобные системы можно разделить на системы, использующие классические методы, и системы с интеллектуализацией. Классические методы настройки регуляторов требуют наличия адекватной модели управления [5], отражающей изменение объекта во всех режимах работы, или использования тестового сигнала [6—7]. Отдельно необходимо выделить системы с использованием эталонной модели [8]. Но в этом случае необходимо знать коэффициент усиления объекта управления, что также требует проведения процедуры идентификации, что сделать в условиях действующего производства практически невозможно.

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-07-06092).

Ряд методов настройки регулятора комбинируют использование эталонной модели с каким-либо методом искусственного интеллекта [9, 10]. Но это не решает проблемы идентификации коэффициента усиления объекта управления во всех режимах работы.

Кроме этого, существует ряд интеллектуальных методов, которые не требуют наличия модели управления: нейронные сети [11–12], нечеткая логика [13–15], а также поисковые методы оптимизации (генетические алгоритмы [16, 17], метод роя частиц [18, 19], пчелиные алгоритмы [20] и др. [21, 22]) Однако, как показали проведенные исследования, по отдельности эти методы также имеют недостатки (отсутствие механизмов обучения, учета специфики работы объекта управления, например, его несимметричности), которые возможно устранить их совместным использованием.

В данной работе предлагается использование нейросетевого настройщика, сочетающего в себе искусственную нейронную сеть и базу правил [23]. Предлагаемый настройщик не требует построения модели объекта управления или использования тестового сигнала.

### Постановка задачи исследования

В данной работе рассматривается система управления главным электроприводом постоянного тока двухвалковой реверсивной прокатной клети, построенная по принципу подчиненного регулирования (рис. 1).

Она состоит из регулятора скорости (РС), регулятора тока (РТ), тиристорного преобразователя (ТП), обмотки якоря (ОЯ) и механической части электропривода (М).

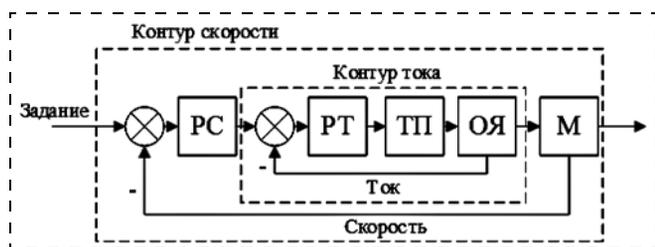


Рис. 1. Структурная схема электропривода постоянного тока

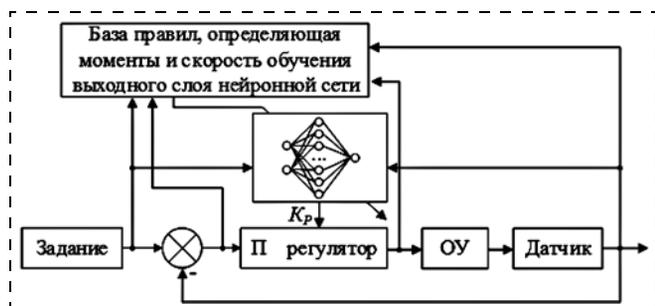


Рис. 2. Контур управления с нейросетевым настройщиком

Задачей данной работы ставится построение нейросетевого настройщика для П регулятора скорости в условиях ступенчатых и линейно нарастающих смен уставок по скорости, что адекватно реальному режиму работы прокатной клети. Для этого необходимо выбрать структуру нейронной сети и разработать базу правил. Для проверки работоспособности метода проведено численное моделирование и сравнение с системой без настройки регулятора скорости в условиях изменения момента инерции электропривода.

### Нейросетевой настройщик

Нейросетевой настройщик состоит из искусственной нейронной сети и базы правил, которая определяет, в какие моменты и с какой скоростью обучать нейронную сеть (рис. 2).

Общий алгоритм выбора структуры нейронной сети настройщика описан в работе [24]. Число слоев будет совпадать с рассматриваемой работой. Далее необходимо рассчитать число нейронов в каждом из слоев сети.

**Входной слой.** Число нейронов на входном слое нейронной сети определяется рассматриваемым регулятором. В данной работе предполагается настраивать П регулятор скорости. Считается, что нейронная сеть должна обладать теми же данными, что и регулятор. В свою очередь, для функционирования П регулятора ему необходимо две величины: текущее задание и отслеживаемая координата электропривода. Исходя из вышесказанного зададимся числом нейронов на входном слое, равным двум.

**Скрытый слой.** Число нейронов скрытого слоя ( $N_{hid}$ ) должно быть не менее  $2N + 1$ , где  $N$  — это число нейронов на входном слое сети. Кроме этого, для определения числа нейронов на скрытом слое сети по формуле (1) из работы [24] необходимо задаться числом точек усреднения ( $N_{av}$ ) измеряемых величин. Примем  $N_{av} = 3$  для всех дальнейших экспериментов. Таким образом,

$$N_{hid} = (2N + 1) + N_{av} - 1, \quad (1)$$

т. е. необходимое число нейронов на скрытом слое сети равно семи.

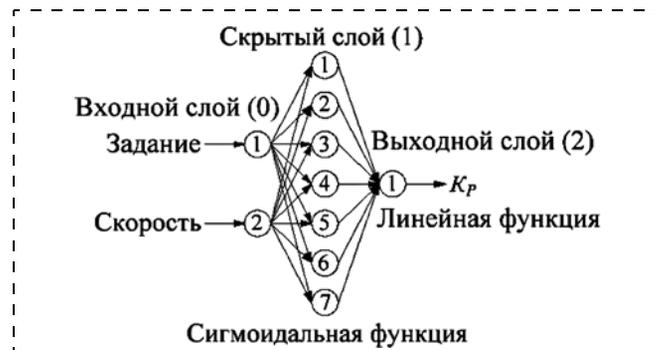


Рис. 3. Структура нейронной сети настройщика

**Выходной слой.** На выходном слое нейронной сети, используемой в нейросетевом настройщике, находится один нейрон, отвечающий за  $K_P$  регулятора скорости. Общая структура сети приведена на рис. 3.

Нейросетевой настройщик вызывается дискретно, раз в  $\Delta t$  секунд. Значение  $\Delta t$  определяется в соответствии с работой [25].

### База правил

В данной работе разработана база правил, определяющая конкретные значения скорости обучения ( $\eta_1^{(2)}$ ) нейрона выходного слоя при каждом вызове метода обучения. Скорость обучения выходного нейрона зависит от текущего перерегулирования по скорости. Несмотря на любые изменения в механике прокатной клетки, перерегулирование должно находиться в пределах, определенных оператором. Для работы базы правил в режиме реального времени в нейросетевом настройщике реализован расчет следующих величин: перерегулирование на текущем переходном процессе ( $\sigma$ ), скорость электродвигателя при предыдущем вызове нейросетевого настройщика ( $n_{\text{шаг назад}}$ ), текущее установившееся значение задания ( $g_{\text{cur}}$ ), установившееся значение задания по скорости для предыдущего переходного процесса ( $g_{\text{prev}}$ ). Значения нижней ( $\sigma_{\text{min}}$ ) и верхней границ перерегулирования ( $\sigma_{\text{max}}$ ) задаются оператором исходя из требований технологического процесса на первой итерации работы нейросетевого настройщика. Также для каждого переходного процесса необходимо рассчитать отставание кривой скорости от кривой задания в тот момент, когда задание достигает своего установившегося значения:

$$\xi = \frac{|n - g_{\text{prev}}|}{|g_{\text{cur}} - g_{\text{prev}}|}. \quad (2)$$

Рассмотрим предлагаемые правила.

ЕСЛИ перерегулирование превышает значение, выбранное оператором, И  $\sigma > 0$ , ТО необходимо

уменьшить коэффициент П регулятора  $K_P$ . Скорость вычисляется по формуле

$$\eta_1^{(2)} = K_P \frac{|\sigma_{\text{min}} - \sigma|}{|\sigma_{\text{min}}|} \xi \frac{1}{|n - n_{\text{шаг назад}}|}. \quad (3)$$

ЕСЛИ перерегулирование не достигает необходимого значения, выбранного оператором, И  $\sigma > 0$ , ТО необходимо увеличить  $K_P$ :

$$\eta_1^{(2)} = K_P \frac{|\sigma_{\text{max}} - \sigma|}{|\sigma_{\text{max}}|} \xi \frac{1}{|n - n_{\text{шаг назад}}|}. \quad (4)$$

ЕСЛИ кривая скорости приближается к кривой задания, И кривая скорости пересекла задание, И кривая задания еще не достигла установившегося значения, ТО необходимо уменьшить  $K_P$ :

$$\eta_1^{(2)} = K_P \frac{|\sigma_{\text{max}} - \sigma|}{|\sigma_{\text{max}}|} \frac{1}{|n - n_{\text{шаг назад}}|}. \quad (5)$$

ЕСЛИ переходный процесс завершился, И кривая скорости не достигла кривой задания, ТО необходимо увеличить  $K_P$ . Скорость  $\eta_1^{(2)}$  вычисляется по формуле (5).

### Описание эксперимента

Эксперименты по применению нейросетевого настройщика проводили на модели электропривода прокатной клетки, обеспечивающего вращение прокатных валков. Модель построена по техническим параметрам двухвалковой реверсивной клетки 1000 (рис. 4). Электродвигатель, обеспечивающий вращение прокатных валков, имеет следующие характеристики: номинальная мощность — 3,5 МВт, номинальный ток якоря — 3865 А, пределы регулирования скорости вращения — 0...60/150 мин<sup>-1</sup>, номинальное напряжение якоря — 997 В. Для возможности изменения параметров механической части электропривода блок, отвечающий за моделирование механики, реализован в виде  $s$ -функции  $Int$ .

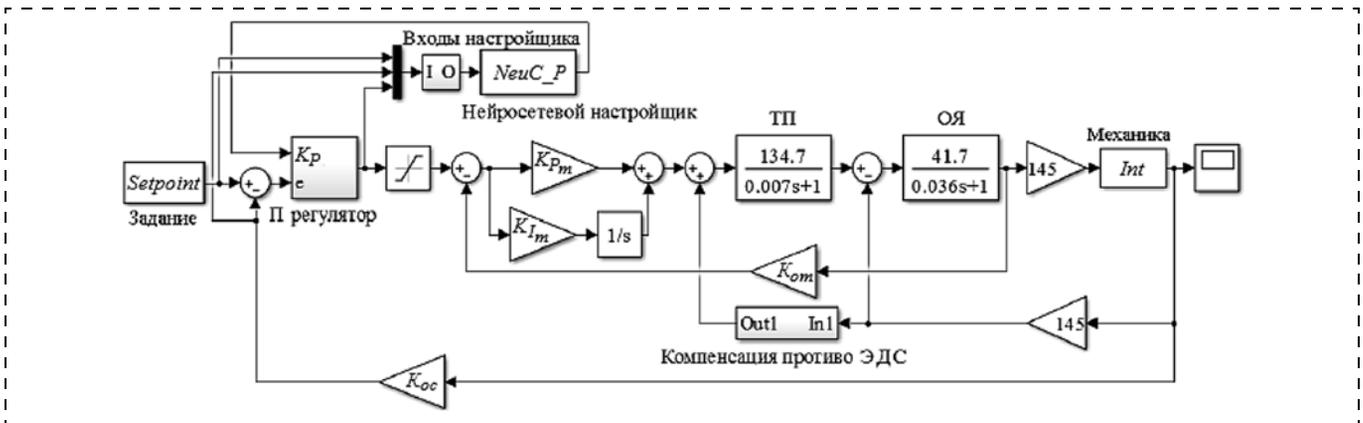


Рис. 4. Модель электропривода постоянного тока прокатной клетки

Нейросетевой настройщик также реализован с использованием  $s$ -функции  $neuC\_P$ .

На рис. 4  $K_{Pm}$  (0,489) и  $K_{Im}$  (13,649) — коэффициенты ПИ регулятора тока, значения которых были рассчитаны в соответствии с настройкой конту-

Результаты первой серии экспериментов

$\Delta g$ , В/мс	$K_{Pstart}$	$K_{Pfinal}$	$\Delta K_P$ , %	$n$
Ступенчатое задание	2,6175	1,735	0,6	9
	0,8725	1,744	0,1	10
8	2,6175	1,74	0,3	10
	0,8725	1,74	0,3	8
0,8	2,6175	1,735	0,6	11
	0,8725	1,73	0,8	12
0,08	2,6175	1,73	0,8	8
	0,8725	1,75	0,3	7
0,04	2,6175	1,71	2	16
	0,8725	1,7	2,6	13
0,008	2,6175	1,745	0	7
	0,8725	1,71	2	6

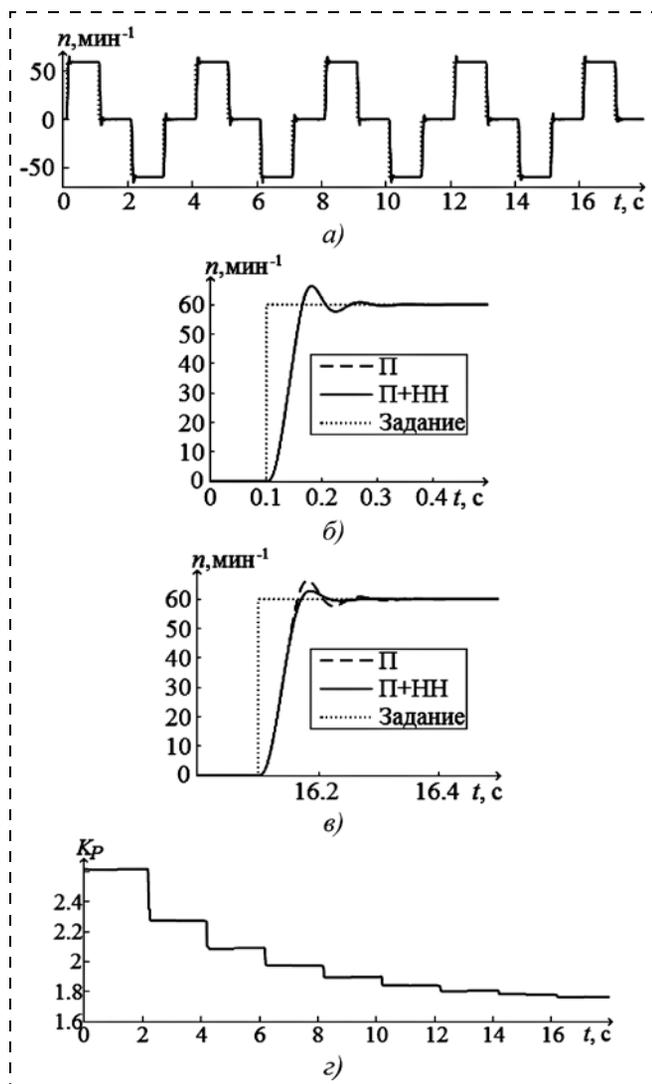


Рис. 5. Результаты первой серии экспериментов ( $K_{Pstart} = 2,6175$ ):  $a$  — частота вращения,  $b$  — первый переходный процесс,  $c$  — последний переходный процесс,  $d$  — коэффициент усиления регулятора скорости

ра на технический оптимум. На этот же оптимум ( $K_P = 1,745$ ) был настроен и П регулятор контура скорости, реализованный в подсистеме "П регулятор". Модель обмотки якоря представляет собой аperiodическое звено первого порядка со значениями параметров  $K_{\dot{\omega}} = 41,7$  и  $T_{\dot{\omega}} = 0,036$  с. Механическая часть электропривода представлена одной массой, описываемой интегрирующим звеном ( $J = 4,798 \cdot 10^3$  кг  $\cdot$  м $^2$ ). Оно реализовано в виде  $s$ -функции, поскольку  $J$  изменяет свое значение непосредственно в процессе моделирования. Коэффициент обратной связи по скорости  $K_{oc}$  равен 0,637; коэффициент обратной связи по току  $K_{от}$  равен  $9,407 \cdot 10^{-4}$ .

Нейросетевой настройщик также реализован в виде  $s$ -функции "NeuC\_P". Его входные сигналы (скрыты в блоке "Входы настройщика") включают в себя: задание по скорости, действующее значение скорости и выход П регулятора скорости. Также в блоке "Входы настройщика" реализуются задержки действующего значения скорости на  $\Delta t$  и  $2\Delta t$  с. Выход нейросетевого настройщика совпадает с выходом нейронной сети.

Задание по скорости реализовано с помощью  $s$ -функции  $Setpoint$  и представляет собой последовательность уставок:  $0 \text{ мин}^{-1}$  (0 В)  $\rightarrow$   $60 \text{ мин}^{-1}$  (4 В)  $\rightarrow$   $0 \text{ мин}^{-1}$  (0 В)  $\rightarrow$   $-60 \text{ мин}^{-1}$  (-4 В).

Для демонстрации работоспособности настройщика в различных условиях работы электропривода интенсивность нарастания картины задания ( $\Delta g$ ) для различных опытов изменялась от 0,008 В/мс до ступенчатого задания.

Проводили две серии экспериментов. В первой серии эксперимент начинался с неоптимальной настройкой регулятора ( $K_{Pstart}$ ) для текущих параметров привода. Нейросетевой настройщик за  $n$  переходных процессов (учитывалось число разгонов электропривода со скорости  $0 \text{ мин}^{-1}$  до  $60$  ( $-60$ )  $\text{ мин}^{-1}$ ) возвращал настройку П регулятора скорости ( $K_{Pfinal}$ ). Рассчитана относительная разница конечного и номинального коэффициентов П регулятора скорости ( $\Delta K_P$ ). Результаты первой серии экспериментов отражены в таблице.

На рис. 5 изображены результаты эксперимента с начальным  $K_{Pstart} = 2,6175$  и ступенчатым заданием. За девять переходных процессов в контуре скорости настройщику удалось вернуть  $K_P$  к оптимальному значению с ошибкой  $\Delta K_P = 0,6$  %, что позволило улучшить качество последнего переходного процесса относительно первого.

Во второй серии экспериментов моделировалось изменение момента инерции электропривода (рис. 6). Нейросетевой настройщик должен был компенсировать дрейф момента инерции электропривода, изменяя настройку регулятора скорости. На графиках приведены результаты эксперимента со ступенчатым заданием. На рис. 6  $\Delta \sigma$  — это относительная разница фактического и заданного оператором перерегулирования.

Система с использованием нейросетевого настройщика (П + НН), по сравнению с системой без настройки (П), во всех экспериментах позволила сохранить требуемое перерегулирование во время дрейфа механической части электропривода. Также проводили эксперименты для интенсивностей (8; 0,8; 0,08; 0,04; 0,008), в каждом из них нейросетевой настройщик поддерживал перерегулирование в допустимых пределах.

Перейдем к экспериментам на физической модели электропривода постоянного тока.

Эксперименты по применению нейросетевого настройщика для системы подчиненного регулирования скорости электродвигателя постоянного тока проводили на экспериментальном стенде, состоящем из персонального компьютера (ПК) и лаборатории NI ELVIS II с установленной платой Quanser DCMCT. NI ELVIS II подключается к ПК с помощью USB-кабеля.

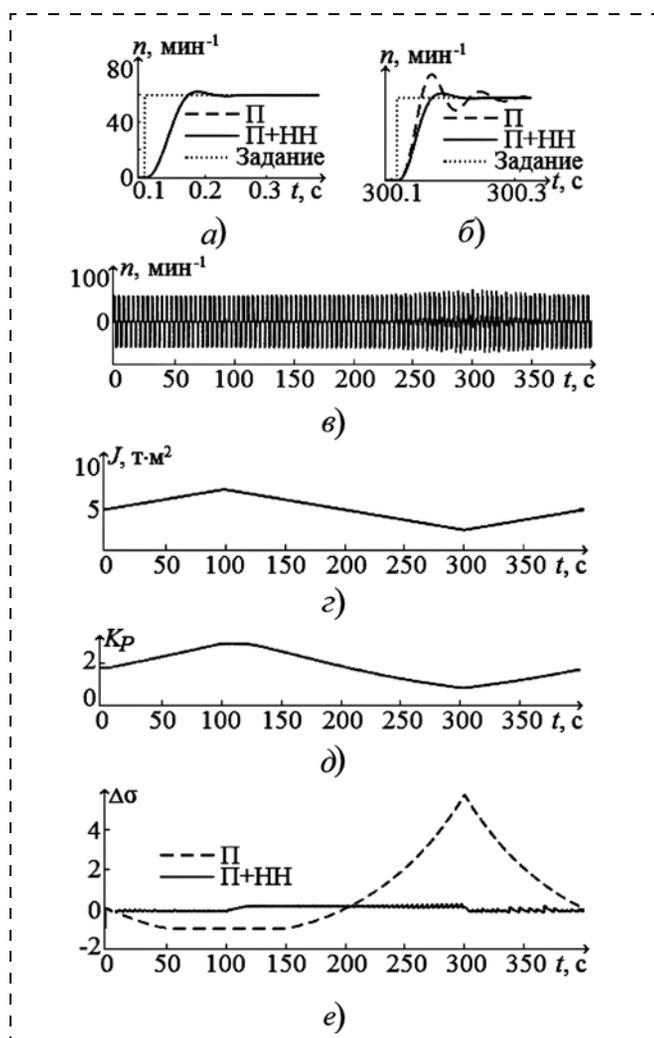


Рис. 6. Результаты второй серии экспериментов: а — первый переходный процесс; б — переходный процесс при максимальном изменении  $J$ ; в — частота вращения; г — момент инерции; д — коэффициент усиления регулятора скорости; е — относительная разность фактического и заданного оператором перерегулирования

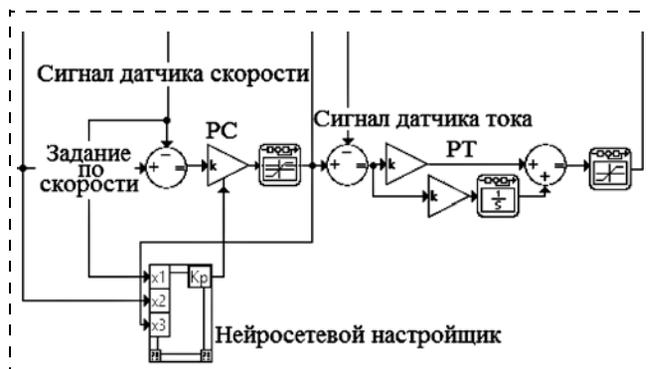


Рис. 7. Система управления электроприводом постоянного тока

Плата Quanser DCMCT оснащена электродвигателем постоянного тока с энкодером и маховиком на валу электродвигателя. Управление двигателем реализуется изменением питающего напряжения с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

В программном пакете LabVIEW 2013 была построена система управления. Она состоит из регулятора тока PC, регулятора тока РТ и нейросетевого настройщика (рис. 7).

Выходом системы управления является сигнал задания, подаваемый на преобразователь напряжения.

Картина уставок представляет собой следующую последовательность смен заданий по скорости:  $0 \text{ мин}^{-1} \rightarrow 100 \text{ мин}^{-1} \rightarrow 0 \text{ мин}^{-1} \rightarrow -100 \text{ мин}^{-1}$ . При этом на скорости  $100 \text{ мин}^{-1}$  электропривод работает 1,25 с, а на скорости  $0 \text{ мин}^{-1}$  — 1 с. Смена задания происходит в виде линейно нарастающего сигнала, причем значение задания по скорости  $100 \text{ мин}^{-1}$  достигается за  $1/8$  с.

Нейросетевой настройщик реализован в виде программного кода MATLAB и импортирован в LabVIEW с помощью узла Математики (MathScript Node).

Параметры регулятора тока ( $K_{pm} = 8,33$ ,  $K_{Im} = 1670$ ) рассчитаны в соответствии с настройкой на технический оптимум. Для П регулятора скорости оптимальным значением  $K_p$  является 0,006. На рис. 8 представлены переходные процессы в кон-

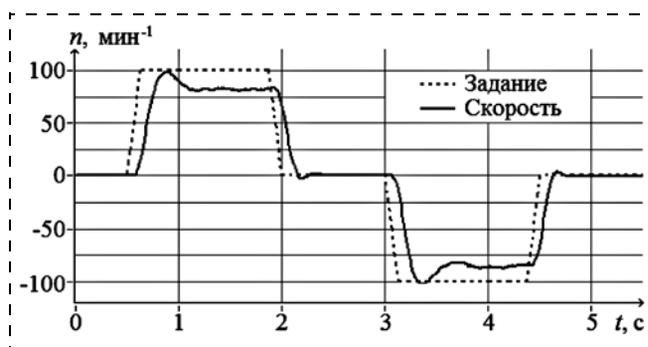
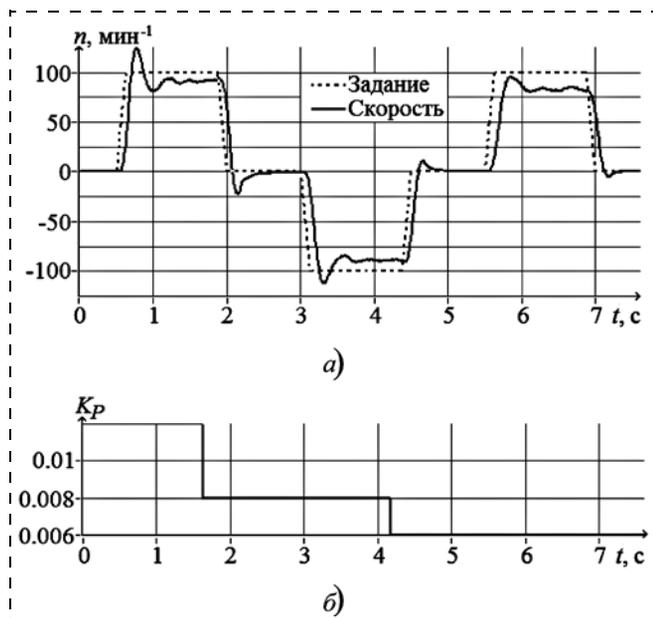
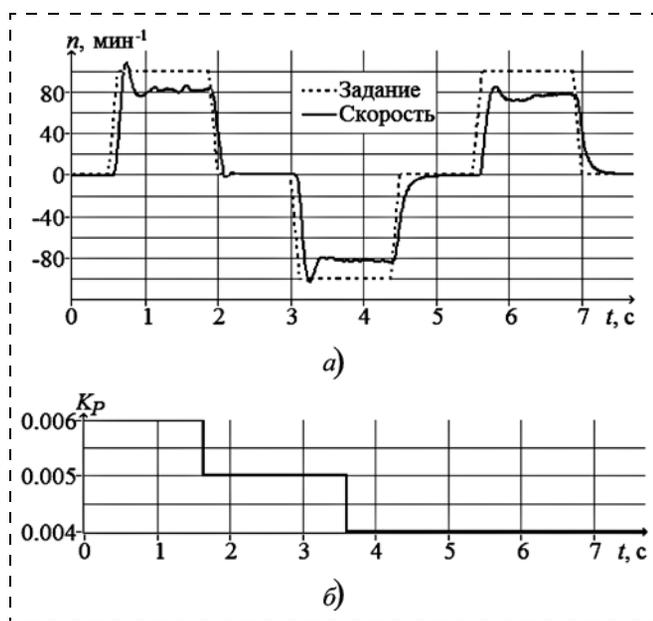


Рис. 8. Результаты эксперимента с оптимальными параметрами ПИ регулятора тока и П регулятора скорости

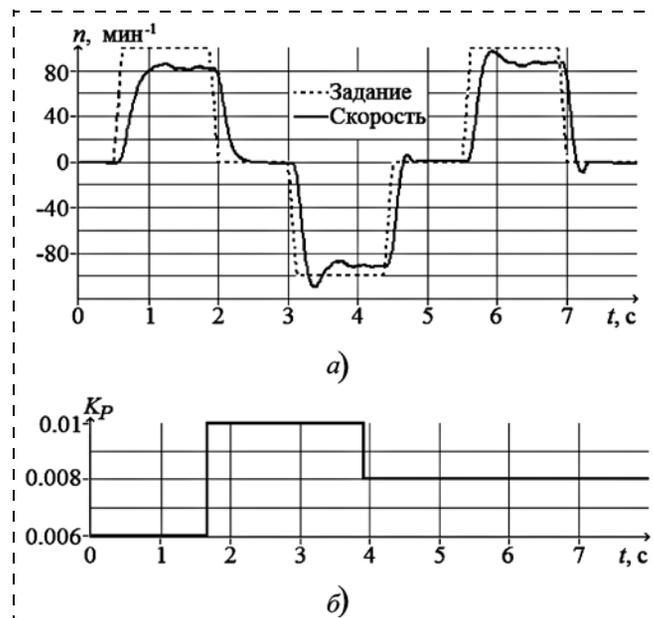


**Рис. 9. Результаты эксперимента с оптимальными параметрами ПИ регулятора скорости и вдвое увеличенным параметром  $P$  регулятора тока:**  
 а — частота вращения; б — коэффициент усиления регулятора скорости



**Рис. 10. Результаты эксперимента с уменьшенным моментом инерции электропривода:**  
 а — частота вращения; б — коэффициент усиления регулятора скорости

турах скорости и тока при оптимальных параметрах регуляторов. Перерегулирование равно 0, а статическая ошибка — 15 %, которая возникает из-за большого статического момента относительно момента вращения двигателя. В данном случае устранить статическую ошибку, используя регулятор скорости П типа, невозможно. Таким образом, для проведения экспериментов по применению нейросетевого настройщика на натурном стенде база правил была доработана с использованием значе-



**Рис. 11. Результаты эксперимента с увеличенным моментом инерции электропривода:**  
 а — частота вращения; б — коэффициент усиления регулятора скорости

ния статической ошибки предыдущего переходного процесса в качестве установившегося режима.

На рис. 9 приведены результаты эксперимента, в котором начальное значение  $K_p$  было увеличено вдвое ( $K_p = 0,012$ ) относительно оптимального значения. Нейросетевой настройщик вернул значение  $K_p$  регулятора скорости к оптимальному за четыре смены задания по скорости. Это позволило снизить перерегулирование в контуре скорости на 25 %.

В ходе эксперимента, в котором начальное значение  $K_p$  было уменьшено вдвое ( $K_p = 0,003$ ) относительно оптимального значения, нейросетевой настройщик вернул значение  $K_p$  регулятора скорости к оптимальному за три смены задания по скорости. Это позволило вернуть необходимую динамику контура скорости.

На рис. 10 приведены результаты эксперимента со сниженным моментом инерции электропривода (это достигалось снятием маховика). Нейросетевой настройщик, в соответствии с базой правил, определил новое оптимальное значение  $K_p$ , что позволило снизить перерегулирование на 8 %.

На рис. 11 приведены результаты эксперимента с увеличенным вдвое моментом инерции электропривода (это достигалось установкой маховика большей массы). Нейросетевой настройщик, в соответствии с базой правил, нашел новое значение  $K_p$ , что позволило вернуть необходимую динамику электропривода.

### Заключение

По результатам опытов можно сделать вывод о том, что нейросетевой настройщик достаточно

эффективно применен при решении задачи настройки регулятора скорости. Результаты достигнуты как на математической модели электропривода, так и на экспериментальном стенде. Целью дальнейшего развития нейросетевого настройщика в системе управления электроприводом прокатной клетки ставится применение его для компенсации возмущений, вызываемых захватом заготовки.

#### Список литературы

1. **Kun E., Veisz T. S.** Energy efficiency enhancement in the Hot Rolling Mill // *Materials Science and Engineering*. 2014. N. 3.2. P. 43–50.
2. **Stashinov Y. P.** On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modular optimum. Part 1 // *Russian Electrical Engineering*. 2016. N. 87. 1. P. 1–5.
3. **Ротац В. Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.
4. **Новоселов Б. В.** и др. Автоматы-настройщики следящих систем. М.: Энергия, 1975. 264 с.
5. **Александров А. Г.** Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высшая школа, 1989. 263 с.
6. **Graham A. E., Young A. J., Xie S. Q.** Rapid tuning of controllers by IFT for profile cutting machines // *Mechatronics*. 2007. Vol. 17. N. 2. P. 121–128.
7. **Abedini S., Zarabadipour H.** Tuning of an optimal PID controller with iterative feedback tuning method for DC motor // 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation. IEEE, 2011. P. 611–615.
8. **Краснодубец Л. А., Олейников А. М.** ПИД регулятор как платформа для реализации адаптивных законов управления электроприводом // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. № 12 (17). С. 809–816.
9. **Shahgholian G.** et al. Analysis of speed control in DC motor drive by using fuzzy control based on model reference adaptive control // 13th International Conference on ECTI-CON. IEEE, 2016. P. 1–6.
10. **Li Z.** Model reference adaptive controller design based on fuzzy inference system // *Journal of Information & Computational Science*. 2011. Vol. 8.9. P. 1683–1693.
11. **Nath K.** et al. Speed Control of Neural Network Based Energy Efficient DC Drive // Second International Conference on ICACSE. IEEE, 2015. P. 318–323.
12. **Zhang S. M., Zhou X., Yang L.** Adaptive PID regulator based on neural network for DC motor speed control. 2011 International Conference on ICECE. IEEE, 2011. P. 1950–1953.

13. **Fan L., Liu Y.** Fuzzy Self-Tuning PID Control of the Main Drive System for Four-High Hot Rolling Mill // *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. 2015. Vol. 14. P. 01. P. 11–22.

14. **Ланграф С. В.** и др. Динамика электропривода с нечетким регулятором // *Известия Томского политехнического университета*. 2010. Т. 316. № 4. С. 168–173.

15. **Черный С. П., Новак Д. А.** Нечеткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2012. № 4. С. 56–60.

16. **Sundareswaran K., Vasu M.** Genetic tuning of PI controller for speed control of DC motor drive // *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology*. IEEE, 2000. Vol. 1. P. 521–525.

17. **Bindu R., Namboothiripad M. K.** Tuning of PID controller for DC servo motor using genetic algorithm // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012. Vol. 2. N. 3. P. 310–314.

18. **Allaoua B., Gasbaoui B., Mebarki B.** Setting up PID DC motor speed control alteration parameters using particle swarm optimization strategy // *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 2009. Vol. 14. P. 19–32.

19. **Alloua B., Laoufi A., Gasbaoui B., Abderrahmani A.** Neuro-Fuzzy DC Motor speed Control Using Particle Swarm Optimization // *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 2009. Vol. 15. P. 1–18.

20. **Mishra A. K.** et al. Speed control of DC motor using artificial bee colony optimization technique // *International Conference on CARE*. IEEE, 2013. P. 1–6.

21. **Das K. R., Das D., Das J.** Optimal tuning of PID controller using GWO algorithm for speed control in DC motor // *International Conference on ICSTI*. IEEE, 2015. P. 108–112.

22. **Madadi A., Motlagh M. M.** Optimal control of DC motor using grey wolf optimizer algorithm // *TJEAS Journal*-2014-4-04/373-379. 2014. Vol. 4. N. 4. P. 373–379.

23. **Еременко Ю. И., Глушенко А. И., Петров В. А.** О нейросетевой адаптации параметров ПИ-регулятора контура тока системы управления прокатной клетью в реальном времени // *Системы управления и информационные технологии*. 2016. № 3 (65). С. 62–68.

24. **Еременко Ю. И., Глушенко А. И.** О разработке метода выбора структуры нейронной сети для решения задачи адаптации параметров линейных регуляторов // *Управление большими системами*. 2016. Вып. 62. С. 75–123.

25. **Еременко Ю. И., Полещенко Д. А., Глушенко А. И.** О разработке метода определения значений задержек входных сигналов нейронной сети при реализации нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. № 10. С. 157–168.

## Concerning the Use of a Neural Tuner for Adjustment of the Speed P-controller of a Rolling Mill's Main Drive

**Yu. I. Eremenko**, erem49@mail.ru✉, **A. I. Glushchenko**, strondutt@mail.ru,

**V. A. Petrov**, 79040882508@ya.ru,

Department of Automated and Information Control Systems,  
Sary Oskol Technological Institute named after Ugarov, MISIS National University  
of Science and Technology (branch), Sary Oskol, 309516, Russian Federation

*Corresponding author: Eremenko Yuri I., Professor, Sary Oskol Technological Institute named after Ugarov, MISIS National University of Science and Technology (branch), Sary Oskol, 309516, Russian Federation, e-mail: erem49@mail.ru*

*Received on March 23, 2017*

*Accepted on April 14, 2017*

*Rolling production is one of the most energy-consuming sectors of the metallurgical industry. The most powerful plants are the rolling mills producing rough rolling of the steel casts. They are based on the technology of the reverse rolling. It requires variation of the roll mill parameters. Such a variation may also be due to replacement of the worn out rolls. So, the controllers*

with constant parameters usage results in the deterioration of the transient quality for the rolling mill main drive. An adaptive control system can be developed to solve the problem. A brief analysis of the linear controller tuners is presented in this research and a neural tuner is proposed to solve the problem. It combines an artificial neural network and a rule base. It does not require identification of the plant model or use of the test signals. In this paper the authors consider a control system for the main DC electric drive of a two-roll reversing rolling mill. A structure for the neural network is selected and the rule base is described. It defines the moments, when a controller should be adjusted (training of the neural network) as well as an appropriate learning rate. Experiments for application of the neural tuner were conducted using the rolling mill DC electric drive model, as well as a physical model of this drive. An analysis of the experimental results shows, that the neural tuner adjusts the speed of the controller effectively. The purpose of the further research is to apply the neural tuner to compensate for the disturbances acting on the rolling mill and caused by the steel cast engagement.

**Keywords:** controller parameters' tuning, speed P-controller, rolling mill, DC drive, adaptive control, multiloop control, neural network, rule base, neural tuner, speed loop

**Acknowledgements:** The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 15-07-06092).

For citation:

Eremenko Y. I., Glushchenko A. I., Petrov V. A. Concerning the Use of a Neural Tuner for Adjustment of the Speed P-controller of a Rolling Mill's Main Drive, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 685–692.

DOI: 10.17587/mau.18.685-692

### References

1. Kun E., Veisz T. S. Energy efficiency enhancement in the Hot Rolling Mill, *Materials Science and Engineering*, 2014, no. 3.2, pp. 43–50.
2. Stashinov Y. P. On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modular optimum. Part 1, *Russian Electrical Engineering*, 2016, no. 87.1, pp. 1–5.
3. Rotach V. Ja. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of automatic control: a textbook for high schools), Moscow, Publishing house of MJeI, 2008, 396 p. (in Russian).
4. Novoselov B. V. et al. *Avtomaty-nastrojshhiki sledjashhikh sistem* (Automatic tuners for servo systems), Moscow, Jenergija, 1975, 264 p. (in Russian).
5. Aleksandrov A. G. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy* (Optimal and adaptive control systems), Moscow, Vysshaja shkola, 1989, 263 p. (in Russian).
6. Graham A. E., Young A. J., Xie S. Q. Rapid tuning of controllers by IFT for profile cutting machines, *Mechatronics*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 121–128 (in Russian).
7. Abedini S., Zarabadipour H. Tuning of an optimal PID controller with iterative feedback tuning method for DC motor, *2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation, IEEE*, 2011, pp. 611–615.
8. Krasnodubec L. A., Olejnikov A. M. *PID reguljator kak platforma dlja realizacii adaptivnyh zakonov upravlenija jelektrivodom* (PID controllers as a platform for implementation of the adaptive laws of the electric drive control), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 12, pp. 809–816 (in Russian).
9. Shahgholian G. et al. Analysis of speed control in DC motor drive by using fuzzy control based on model reference adaptive control, *13th International Conference on ECTI-CON, IEEE*, 2016, pp. 1–6.
10. Li Z. Model reference adaptive controller design based on fuzzy inference system, *Journal of Information & Computational Science*, 2011, vol. 8.9, pp. 1683–1693.
11. Nath K. et al. Speed Control of Neural Network Based Energy Efficient DC Drive, *Second International Conference on ICACCE, IEEE*, 2015, pp. 318–323.
12. Zhang S. M., Zhou X., Yang L. Adaptive PID regulator based on neural network for DC motor speed control, *2011 International Conference on ICECE, IEEE*, 2011, pp. 1950–1953.
13. Fan L., Liu Y. Fuzzy Self-Tuning PID Control of the Main Drive System for Four-High Hot Rolling Mill, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 2015, vol. 14, no. 01, pp. 11–22.
14. Langraf S. V. i dr. *Dinamika jelektrivoda s nechjotkim reguljatorom* (Fuzzy controller based drive dynamics), *Izvestija Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 168–173 (in Russian).
15. Chernyj S. P., Novak D. A. *Nechetkaja mnogokaskadnaja sistema upravlenija jelektrivodom postojannogo toka* (Fuzzy cascade control system for DC drive), *Jeletrotehnicheskie Kompleksy I Sistemy Upravlenija*, 2012, no. 4, pp. 56–60 (in Russian).
16. Sundareswaran K., Vasu M. Genetic tuning of PI controller for speed control of DC motor drive, *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology, IEEE*, 2000, vol. 1, pp. 521–525.
17. Bindu R., Namboothiripad M. K. Tuning of PID controller for DC servo motor using genetic algorithm, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 310–314.
18. Allaoua B., Gasbaoui B., Mebarki B. Setting up PID DC motor speed control alteration parameters using particle swarm optimization strategy, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 2009, vol. 14, pp. 19–32.
19. Alloua B., Laoufi A., Gasbaoui B., Abderrahmani A. Neuro-Fuzzy DC Motor speed Control Using Particle Swarm Optimization, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 2009, vol. 15, pp. 1–18.
20. Mishra A. K. et al. Speed control of DC motor using artificial bee colony optimization technique, *International Conference on CARE, IEEE*, 2013, pp. 1–6.
21. Das K. R., Das D., Das J. Optimal tuning of PID controller using GWO algorithm for speed control in DC motor, *International Conference on ICSCCTI, IEEE*, 2015, pp. 108–112.
22. Madadi A., Motlagh M. M. Optimal control of DC motor using grey wolf optimizer algorithm, *TJEAS Journal-2014-4-04/373-379*, 2014, vol. 4, no. 4, pp. 373–379.
23. Eremenko Ju. I., Glushhenko A. I., Petrov V. A. *O nejrosetevoj adaptacii parametrov PI-reguljatora kontura toka sistemy upravlenija prokatnoj kletju v real'nom vremeni* (Rolling mill current control loop pi-controller parameters adaptation based on neural tuner), *Sistemy Upravlenija i Informacionnye Tehnologii*, 2016, no. 3 (65), pp. 62–68 (in Russian).
24. Eremenko Ju. I., Glushhenko A. I. *O razrabotke metoda vybora struktury nejronnoj seti dlja reshenija zadachi adaptacii parametrov linejnyh reguljatorov* (On development of neural network structure selection method to solve linear controllers parameters adjustment problem), *Upravlenie Bol'shimi Sistemami*, 2016, iss. 62, pp. 75–123 (in Russian).
25. Eremenko Ju. I., Poleshhenko D. A., Glushhenko A. I. *O razrabotke metoda opredelenija znachenij zaderzhek vhodnyh signalov nejronnoj seti pri realizacii nejrosetevogo optimizatora parametrov PI-reguljatora* (On development of method to calculate time delay values of neural network input signals to implement PI-controller neural tuner), *Izvestija JuFU. Tehnicheskie Nauki*, 2015, no. 10, pp. 157–168 (in Russian).

**В. В. Инсаров**, д-р техн. наук, зам. начальника подразделения, wiliam@gosniias.ru,  
**В. А. Сафонов**, инженер, vladislav.safonov@gosniias.ru, **С. В. Тихонова**, вед. инженер, svetico@yandex.ru,  
Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва

## Использование безэталонных метрик для оценки качества текущих изображений многообъектных стационарных наземных сцен. Часть 2\*

*Обсуждается оценка чувствительности представленного в работе [1] набора безэталонных метрик к различным факторам типа размытость, зашумленность и различный объектовый состав, оказывающих влияние на качество изображения, а также оценка корреляционных зависимостей между различными метриками. Оценка чувствительности осуществлялась параметрическими (дисперсионный анализ) и непараметрическими методами (критерий Краскелу—Уоллиса) математической статистики. Корреляционный анализ проводился с помощью корреляции Пирсона и Спирмена.*

*Результаты, полученные в ходе оценки, могут позволить в дальнейшем выбрать наиболее чувствительные и наименее затратные с вычислительной точки зрения метрики для предварительной оценки качества изображения в системах технического зрения.*

**Ключевые слова:** оценка качества изображений, безэталонные метрики, дисперсионный анализ, критерий Краскелу—Уоллиса, корреляционные связи

### Введение

Одной из важнейших операций, связанных с обработкой и анализом изображений в системах технического зрения летательных аппаратов, является оценка качества получаемого изображения. Эта оценка необходима для принятия решения о принципиальной возможности или невозможности использования текущего изображения в дальнейших операциях обработки и при выборе процедур такой обработки. Предварительная оценка качества изображения позволяет существенно сократить вычислительные ресурсы при решении задач обнаружения, распознавания и селекции объектов наземных сцен.

Для оценки качества поступающей информации могут быть использованы различного рода метрики, которые можно подразделить на несколько групп:

- *эталонные метрики* (full-reference, FR), в которых используется некоторый эталон для вычисления меры степени сходства характеристик исходного изображения и характеристик этого эталона;
- *псевдоэталонные* (reduce-dreference, RR) метрики, в которых используется некоторая априорная информация, например, математическое ожидание и дисперсия изображения;
- *безэталонные метрики* (non-reference), в которых не предполагается наличие какой-либо дополнительной информации о текущем изображении.

В части 1 статьи [1] авторами был рассмотрен представительный набор безэталонных метрик,

разделенный на три группы: метрики, основанные на вычислении производной изображения, на статистической обработке и на преобразовании исходного изображения. Были приведены примеры результатов вычисления данных метрик для полутонных изображений многообъектных наземных стационарных сцен промышленно-городской застройки. Здесь будет рассмотрена оценка чувствительности приведенных ранее метрик к различным факторам, влияющим на качество изображения, а также оценка корреляционных зависимостей между различными метриками.

Целью проводимой работы является упрощение процедуры оценки качества изображений в реальном времени и повышение ее эффективности за счет исключения взаимосвязанных метрик и выбора из них наиболее адекватных и эффективных с вычислительной точки зрения.

### Методика оценки чувствительности метрик к различным факторам, влияющим на качество изображения

Задача оценки чувствительности метрик к различным факторам в данной работе решается методом дисперсионного анализа (параметрический метод) и непараметрическим методом [2—4].

- ♦ *Методика оценки чувствительности метрик непараметрическим методом*

Методика проведения дисперсионного анализа заключается в следующем: пусть есть некоторый возмущающий фактор (например, уровень шума), значения которого разбиты на  $m$  интервалов (зна-

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 17-08-00584 а.

Первая часть статьи опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2017, т. 18, № 8.

чения данного фактора табулируются). Каждому значению данного возмущающего фактора соответствует группа из  $n$  изображений ( $Im_{11}, Im_{21}, \dots, Im_{n1}; \dots; Im_{1m}, Im_{2m}, \dots, Im_{nm}$ ). Учитывая, что каждое изображение в данной задаче описано соответствующим значением исследуемой метрики  $x$ , получаем матрицу

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}.$$

Выдвигается гипотеза о том, что существуют значительные различия значений метрик в зависимости от значения возмущающего фактора. Для подтверждения принятой гипотезы (или отказа от нее) вычисляется величина

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}, \quad (1)$$

где  $s_1^2, s_2^2$  — средние квадраты, формулы для вычисления которых даны далее.

Эта гипотеза подтверждается, если выполняется условие  $F \leq F_{\alpha, k_1, k_2}$ , где  $F_{\alpha, k_1, k_2}$  — критическое значение распределения Фишера—Снедекора, определенное на заданном уровне  $\alpha$  при числе степеней свободы  $k_1 = m - 1$  и  $k_2 = mn - m$ . Значение  $\alpha$  определяет уровень вероятности выполнения принятой гипотезы и лежит в пределах  $[0; 1]$ .

Далее приведены формулы, необходимые для вычисления величины  $F$ . При этом приняты следующие допущения: значения возмущающего фактора статистически взаимонезависимы, имеют нормальный закон распределения с математическим ожиданием, равным нулю, и постоянной дисперсией.

Групповое среднее для  $m$ -го уровня фактора:

$$\bar{x}_{i*} = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n}.$$

Общее среднее

$$\bar{x}_{i**} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}}{mn} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{x}_{i*}}{m}.$$

Межгрупповая (факторная) сумма квадратов отклонений

$$Q_1 = n \sum_{i=1}^m (\bar{x}_{i*} - \bar{x}_{i**})^2.$$

Внутригрупповая (остаточная) сумма квадратов

$$Q_2 = n \sum_{i=1}^m (\bar{x}_{i*} - \bar{x}_{i**})^2;$$

$$s_1^2 = \frac{Q_1}{m-1};$$

$$s_2^2 = \frac{Q_2}{mn-m}.$$

♦ *Методика оценки чувствительности метрик непараметрическим методом*

Для случая, когда закон распределения и его параметры не известны, используется критерий Краскела—Уоллиса [3, 4], который является ранговым критерием, т. е. для вычисления данного критерия используются не сами значения выборок, а их ранги (номера элементов в упорядоченной по возрастанию выборке). Данный критерий пояснен далее.

Рассматриваются  $k$  выборок случайных величин:

$$X_1 = \{x_1^1, \dots, x_1^{n_1}\}, \dots, X_k = \{x_k^1, \dots, x_k^{n_k}\}.$$

Проверяется гипотеза о равенстве медианных значений рассматриваемых выборок случайных величин  $X_1, X_2, \dots, X_k$ .

Упорядочив все  $N = \sum_{i=1}^k n_i$  элементов выборок

по возрастанию и обозначив  $R_{ij}$  ранг  $j$ -го элемента  $i$ -й выборки, воспользуемся следующей формулой для расчета критерия Краскела—Уоллиса:

$$H = \sum_{i=1}^k \left(1 - \frac{n_i}{N}\right) \left\{ \frac{\bar{R}_i - \frac{N+1}{2}}{\sqrt{\frac{(N-n_i)(N+1)}{12n_i}}} \right\}^{1/2} =$$

$$= \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1),$$

где  $R_i = \sum_{j=1}^N R_{ij}$ ;  $\bar{R}_i = \frac{1}{n_i} R_i$ .

Проверяемая гипотеза отклоняется, если выполняется условие  $H \geq H_\alpha$ , где  $H_\alpha$  — критическое значение, вычисляемое по таблицам [3]. При  $n_i \geq 20$  справедлива аппроксимация распределения статистики  $H$   $\chi^2$ -распределением с  $k - 1$  степенями свободы и достоверностью  $\alpha$  ( $\chi_\alpha^2$ -распределением), т. е. гипотеза отклоняется, если  $H \geq \chi_\alpha^2 (k - 1)$ .

**Результаты исследования влияния различных факторов на значения метрик**

Для оценки чувствительности рассматриваемых метрик к таким факторам, как размытость, зашумленность и объективный состав сцен, были составлены соответствующие наборы реальных изображений многообъектных сцен.



Рис. 1. Пример исходных изображений

Для исследования чувствительности метрик к искажению, вызванному размытием по Гауссу, был сформирован набор, состоящий из пяти групп, содержащих по 161 изображению: группы, содержащей исходные неискаженные изображения, пример которых показан на рис. 1, и четырех групп изображений, которые были искусственно размыты фильтром с маской размером  $25 \times 25$  пикселей и со среднеквадратическими отклонениями функции Гаусса  $\sigma = 0,5$ ,  $\sigma = 0,75$ ,  $\sigma = 1,75$ ,  $\sigma = 2,5$ .

Набор для исследования чувствительности метрик к искажению, вызванному нелинейным медианным размытием, состоял из четырех групп изображений: группа исходных изображений (рис. 1), и трех групп изображений, размытых медианным фильтром с масками размером  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$  пикселей.

Для исследования чувствительности к зашумлению гауссовым шумом был составлен набор, состоящий из пяти групп изображений: группы исходных изображений (рис. 1), и четырех групп изображений, полученных зашумлением исходных изображений шумом Гаусса с нулевым математическим ожиданием и СКО, равными  $\sigma = 0,001$ ,  $\sigma = 0,002$ ,  $\sigma = 0,003$ ,  $\sigma = 0,004$ .

Набор изображений для исследования влияния шума типа "Соль-Перец" состоит из пяти групп: группы исходных изображений (рис. 1), и четырех

групп изображений, полученных зашумлением исходных изображений шумом "Соль-Перец" с плотностью  $d = 0,001$ ,  $d = 0,005$ ,  $d = 0,01$ ,  $d = 0,03$ .

Для оценки влияния фактора "объектовый состав сцены" был составлен набор изображений на основе работы [6], состоящий из трех групп, сформированных следующим образом. В первой группе содержались изображения равнин, степей, которые не содержат объектов, кроме дорог и полей, или содержат малое число объектов. Во второй группе находятся изображения, в которых половина объема изображения содержит объекты маленького и среднего размеров. Изображения третьей группы содержат множество объектов малых и средних размеров. Типовые примеры изображений каждой из трех групп приведены на рис. 2, а, б, в, соответственно.

Критические значения  $F_{\alpha, k_1, k_2}$  и  $\chi^2_{1-\alpha}$  для рассматриваемых групп при уровне значимости  $\alpha = 0,01$  равны:  $F_{0,05; 4; 800} = 3,34$ ,  $\chi^2_{0,01}(4) = 13,28$  — для первого, третьего и четвертого наборов изображений;  $F_{0,001; 3; 640} = 3,81$ ,  $\chi^2_{0,01}(3) = 11,34$  — для второго набора;  $F_{0,01; 2; 546} = 4,64$ ,  $\chi^2_{0,01}(2) = 9,21$  — для пятого.

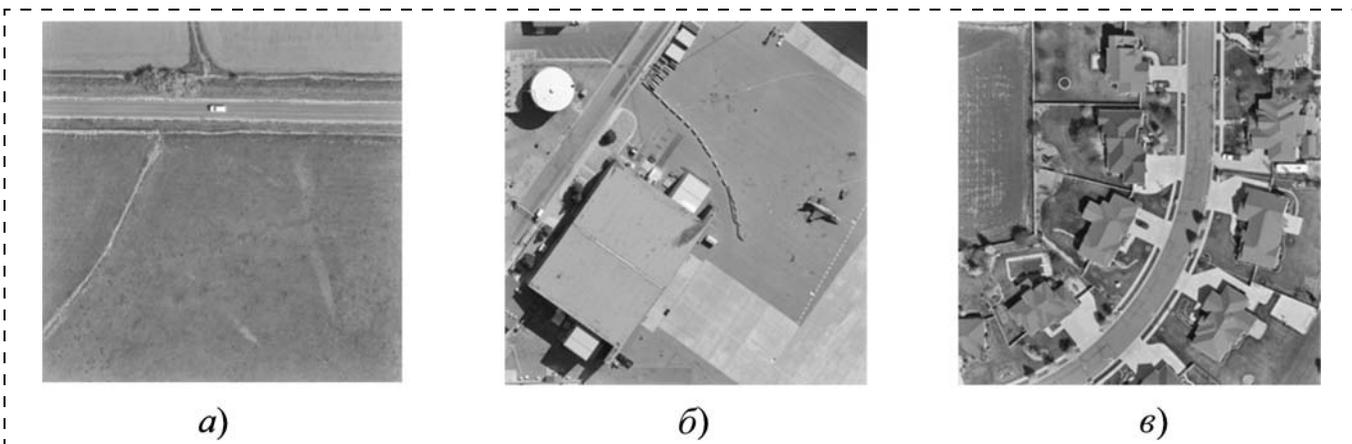


Рис. 2. Пример изображений трех групп для анализа влияния фактора "объектовый состав сцены"

В таблице приведены значения величин  $F(1)$  и  $H(2)$  для рассматриваемых в работе [1] метрик и указанных возмущающих факторов.

Приведенные значения, полученные *параметрическим* ( $F$ ) и *непараметрическим* методами ( $H$ ), позволяют оценить чувствительность метрик при воздействии возмущающих факторов.

Анализируя полученные результаты дисперсионного анализа для размытия по Гауссу, можно увидеть, что все метрики кроме HELM, STDC, GLVN, HISE, DCTE, DCTR чувствительны к данному фактору. Данная взаимосвязь очень ярко выражена для метрик FTMV и FTFM.

Проведенный аналогичный анализ для размытия медианой выявил тот факт, что те метрики, которые были нечувствительны к размытию по Гауссу, также нечувствительны к размытию медианой. Помимо этих метрик слабой чувствительностью стали выделяться метрики AСМО, GLVA, CHEB.

Таким образом, для выявления возмущающего фактора типа размытия пригодны 25 метрик, среди

которых стоит выделить FTFM, которая обладает хорошей чувствительностью к двум типам размытия.

Рассматривая результаты дисперсионного анализа для возмущающего фактора типа шум различного вида (шум Гаусса и шум "Соль-Перец"), можно выделить несколько групп метрик (метрики, основанные на статистической обработке и дискретно-косинусном преобразовании), для которых влияние разного вида и степени зашумленности оказывается несущественным. К ним относятся метрики HELM, GDER, SFIL, AСМО, VOLA, STDC, GLVA, GLVN, GLLV, CHEB, DCTE, DCTR. Из общего рассмотрения можно также исключить метрики LBPA, CURV, TENG, TENV, EIGV, HISE, WAVV, поскольку их чувствительность к рассматриваемым видам шума различна.

Рассматривая все представленные типы размытия и шумов в совокупности, следует выделить метрики GRAE, GRAT, GRAS, SFRQ, BREN, CONT, LAPE, LAPM, LAPD, LAPV, GLVM, DCTM, FTMV, FTMM, FTFM, WAVS, WAVR, ко-

Значения статистики  $F$  и  $H$  при исследовании различных факторов

Название метрики	Исследуемый фактор									
	Размытие по Гауссу		Размытие медианой		Шум Гаусса		Шум "Соль-Перец"		Объектовый состав	
	$F$	$H$	$F$	$H$	$F$	$H$	$F$	$H$	$F$	$H$
GRAE*	208,01	679,23	150,61	328,35	22,40	130,05	158,76	358,57	170,67	223,73
GRAT*	398,28	650,61	226,02	355,09	103,89	292,37	47,75	161,22	29,69	70,73
GRAS*	187,28	663,51	129,96	309,18	68,59	272,81	<b>484,84</b>	<b>495,53</b>	153,84	209,71
SFRQ*	422,55	657,44	270,44	400,28	139,78	349,76	53,87	183,39	18,87	51,18
BREN*	217,54	625,03	106,17	243,86	11,54	64,28	85,74	255,50	312,89	309,68
CONT*	407,65	650,93	266,49	399,37	97,97	282,70	34,96	132,61	23,50	59,56
HELM	1,00	14,23	0,23	8,35	0,24	0,99	1,04	3,44	0,97	1,01
LBPA	234,98	487,09	<b>367,36</b>	424,70	80,11	290,99	0,07	1,91	4,94	84,98
GDER	20,48	83,03	0,19	1,00	0,01	0,01	0,03	0,06	<b>679,68</b>	<b>421,69</b>
SFIL	14,32	52,57	0,47	1,67	0,14	0,97	0,65	3,91	582,51	388,39
CURV	28,81	101,85	13,23	36,87	3,34	11,80	5,47	19,53	287,02	297,98
TENG	214,94	611,71	95,35	224,62	3,28	20,15	24,70	113,81	382,34	339,89
TENV	236,69	629,26	84,26	193,78	0,98	3,42	15,35	87,60	497,82	383,30
LAPE*	198,99	727,12	169,48	379,96	26,61	156,94	186,02	383,61	90,58	150,81
LAPM*	560,31	720,54	330,79	<b>430,92</b>	<b>179,46</b>	<b>399,48</b>	68,53	218,66	6,25	22,99
LAPD*	539,33	715,42	314,96	425,00	105,36	300,50	45,58	166,09	11,86	37,44
LAPV*	198,99	727,11	169,49	379,99	26,61	156,94	186,02	383,62	90,58	150,81
ACMO	4,29	20,71	0,98	3,84	0,04	0,36	0,77	3,57	261,88	285,34
VOLA	140,94	475,87	37,57	93,89	0,13	0,59	0,38	1,71	301,94	310,39
STDC	0,94	6,23	0,10	0,53	0,14	0,59	0,59	2,72	276,42	318,98
GLVA	6,77	30,07	1,61	6,11	0,19	0,90	1,64	6,81	344,77	324,07
GLVN	1,05	0,61	2,00	2,35	0,83	26,01	0,59	0,77	1,28	32,36
GLLV	84,90	360,69	25,23	56,86	0,19	0,34	0,10	0,08	325,35	370,92
GLVM*	178,04	544,98	70,95	154,49	6,02	34,76	42,55	164,80	456,20	365,07
CHEB	5,62	38,52	0,98	6,31	0,25	3,74	1,87	18,68	35,02	75,28
EIGV	21,28	80,83	6,31	19,31	2,05	8,84	11,54	44,43	22,71	53,89
HISE	1,97	15,93	1,99	13,41	13,34	48,22	0,00	0,02	17,66	32,00
DCTE	0,96	139,38	1,00	32,02	1,35	7,68	1,61	19,35	0,91	35,35
DCTR	0,95	66,53	1,00	6,24	1,29	3,55	1,51	4,55	0,93	66,68
DCTM*	199,28	670,65	106,60	310,22	39,11	199,13	272,60	430,13	70,56	114,34
FTMV*	<b>2636,13</b>	741,23	272,53	343,60	131,05	310,63	306,11	512,48	47,16	88,54
FTMM	177,94	686,46	77,47	237,94	18,41	275,34	10,32	398,15	1,16	6,25
FTFM*	2027,72	<b>743,13</b>	326,34	358,92	107,26	249,80	138,06	395,97	9,76	27,55
WAVS*	600,32	731,84	317,65	417,74	149,06	362,98	245,41	409,95	10,68	34,22
WAVV	213,30	721,21	176,04	369,00	2,12	26,47	79,24	270,04	180,75	233,36
WAVR*	145,61	529,99	64,36	148,90	5,36	30,60	35,77	134,09	27,58	35,82
WAVC	1,11	2,43	0,75	0,31	0,78	2,68	0,80	2,77	0,01	1,05

торы являются чувствительными к возмущающим факторам вне зависимости от их природы.

В результате рассмотрения результатов дисперсионного анализа чувствительности метрик к изменению объектового состава сцены можно исключить нечувствительные метрики HELM, GLVN, DCTE, DCTR, FTMM, WAVC.

Важно отметить метрику GDER, которая обладает наибольшей чувствительностью к данному фактору и слабой чувствительностью к иным рассмотренным возмущающим факторам. Иными словами, данная метрика позволяет получить качественную информацию о самой наблюдаемой сцене, а не об искажающих факторах.

При использовании непараметрического теста Краскела—Уоллиса ( $H$  в табл. 1) были получены результаты, аналогичные результатам дисперсионного анализа, в части выявления чувствительных и нечувствительных метрик.

### Корреляционный анализ

Для выявления взаимосвязей между метриками (определения степени линейной взаимосвязи) был проведен корреляционный анализ, включающий в себя вычисление линейной корреляции (корреляция Пирсона) и ранговой корреляции Спирмена [7], а также сравнение полученных результатов.

Для вычисления корреляции Пирсона используется формула

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}},$$

где  $x, y$  — выборки размером  $m$ ;  $\bar{x}, \bar{y}$  — выборочные средние.

Коэффициент  $r_{xy}$  принимает значения из отрезка  $[-1; 1]$ . Равенство  $r_{xy} = 1$  указывает на строгую прямую линейную зависимость,  $r_{xy} = -1$  — на обратную.

Корреляция Спирмена вычисляется по следующей формуле:

$$p = 1 - \frac{6}{n(n-1)(n+1)} \sum_{i=1}^n (R_i - S_i)^2,$$

где  $R_i$  — ранг наблюдения  $x_i$  в рассматриваемом ряду  $x = (x_1, \dots, x_n)$ ;  $S_j$  — ранг наблюдения  $y_j$  в рассматриваемом ряду  $y = (y_1, \dots, y_n)$ .

Коэффициент  $p$  принимает значения из отрезка  $[-1; 1]$ . Равенство  $p = 1$  указывает на строгую прямую линейную зависимость,  $p = -1$  — на обратную.

Для вычисления коэффициента корреляции использовались выборки значений метрик, вычисленных для изображений с разными типами и составами сцен, полученных в разное время суток, при разных погодных условиях. Вычисленные абсолютные значения коэффициентов корреляции показаны на рис. 3, где уровень яркости соответствует значению коэффициента корреляции (белый цвет соответствует максимально возможному значению коэффициента корреляции, черный цвет — нулевому значению коэффициента корреляции).

На данных графиках видно, что вычисленные разными способами коэффициенты корреляции дают достаточно близкие результаты. По полученным результатам видно, что у метрик HELM, LBPA, VOLA, GLVN, HISE, WAVC слабо выраженная линейная взаимосвязь с остальными метриками. Отчетливо видна большая группа метрик, внутри которой между метриками присутствуют сильные линейные взаимосвязи. Также сильные связи проявляются между метриками STDC и GLVA, DCTE и DCTR.

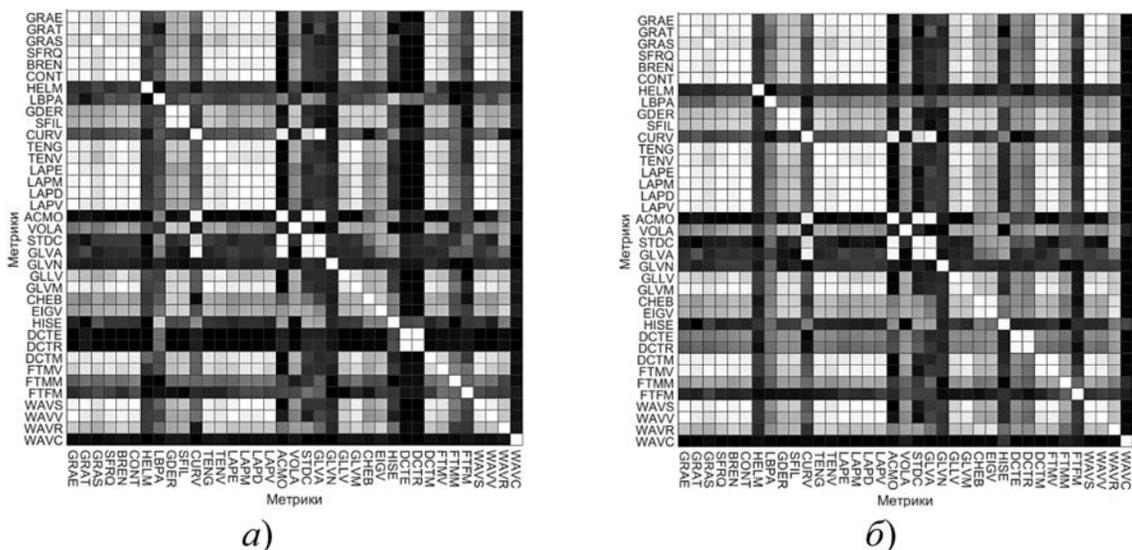


Рис. 3. Абсолютные значения коэффициента корреляции Пирсона (а) и Спирмена (б)

Проведенная оценка чувствительности возможного набора безэталонных метрик, приведенного в части 1 статьи [1], при воздействии рассматриваемых возмущающих факторов типа размытость, зашумленность и различного объектового состава сцен, показал, что для предварительной оценки качества исходных текущих полутоновых изображений многообъектных стационарных сцен целесообразно использовать метрики, отмеченные "\*" в таблице.

Корреляционный анализ приведенного набора метрик показал, что для ряда отмеченных "\*" метрик существует корреляционная зависимость, позволяющая значительно сузить число рассматриваемых метрик.

1. **Инсаров В. В., Сафонов В. А., Тихонова С. В.** Использование безэталонных метрик для оценки качества текущих изображений многообъектных стационарных наземных сцен. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 8. С. 550—557
2. **Гаральд Крамер.** Математические методы статистики. М.: Издательство "Мир", 1975. 648 с.
3. **Кобзарь А. И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
4. **Кремер Н. Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. 551 с.
5. **Kruskal W. H., Wallis W. A.** Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 47, 1952, № 260, pp. 583—621.
6. <https://downloads.greyc.fr/vedai/>
7. **Hollander M., Wolfe D. A.** Nonparametric statistical methods. New York: Wiley, 1973.

## Application of the Non-Reference Metrics for the Quality Estimation of the Current Images of the Stationary Ground Multi-object Scenes. Part 2

**V. V. Insarov**, wiliam@gosniias.ru✉, **V. A. Safonov**, vladislav.safonov@gosniias.ru,  
**S. V. Tikhonova**, svetlana.tikhonova@gosniias.ru,  
Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Aviation Systems",  
Moscow, 125319, Russian Federation

*Corresponding author: Insarov Viliyam V., D. Sc., Professor, Deputy Head of Unit, Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Aviation Systems" State Scientific Centre of Russian Federation, Moscow, 125319, Russian Federation, e-mail: wiliam@gosniias.ru*

*Received on 07.06.2017*

*Accepted on 19.06.2017*

*Quality estimation of the received images is one of the most important operations of image processing in technical vision. This operation allows us to take decisions about a possibility of the image processing and choose the procedures for this processing. A preliminary image quality estimate makes it possible to reduce significantly the computing resources for solving of the problems of objects detection, recognition and selection. This article focuses on estimation of sensitivity of the non-reference metrics (represented in Part 1) to various factors: noises, smoothing and different object compositions. Furthermore, this article focuses on the correlation relationships between the metrics. The main task of this article is simplification of the procedure of a real time image quality estimation and improvement of its effectiveness by removing the related metrics and selecting the most adequate and efficient metrics. Sets of images were created for solving of this task. Those sets contained images with different kinds of scenes and object compositions. Images were received at different times of a day and under different weather conditions. Besides the received images were distorted by different kinds of noises and smoothing. Sensitivity estimation was measured by the method of analysis of variance and Kruskal—Wallis test. The correlation analysis of the relationships between the metrics was done by means of Pearson correlation coefficient and Spearman's rank correlation coefficient. The analysis of the sensitivity estimation results for the presented set of metrics revealed that it was appropriate to use a limited number of metrics. Further results of the correlation analysis revealed that there was a strong linear relationship for a number of metrics. Thus, the obtained results made it possible to select the most sensitive metric with the least computational costs for a preliminary estimation of the quality image in the vision systems.*

**Keywords:** *image quality estimation, non-reference metrics, time of day effects, analysis of variance, Kruskal—Wallis test, correlation*

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 17-08-00584 a

For citation:

**Insarov V. V., Safonov V. A., Tikhonova S. V.,** Application of the Non-Reference Metrics for the Quality Estimation of the Current Images of the Stationary Ground Multi-object Scenes. Part 2, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 693—698.

DOI: 10.17587/mau.18.693-698

### References

1. **Insarov V. V., Safonov V. A., Tikhonova S. V.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol.18, no. 8, pp. 550—557. (in Russian).

2. **Harald Cramér.** *Matematicheskie metody statistiki* (Mathematical Methods of Statistics), Moscow, Mir Publishers, 1975 (in Russian).
3. **Kobzar A. I.** *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* (Applied mathematical statistics. For engineers and scientists), Moscow, FIZMATLIT, 2006 (in Russian).
4. **Kremer N. Sh.** *Teoria veroitnostey I matematicheskai statistica* (Probability theory and mathematical statistics), Moscow, Unity, 2009 (in Russian).
5. **Kruskal W. H., Wallis W. A.** Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 1952, vol. 47, no. 260, pp. 583—621.
6. **Available** at <https://downloads.greyc.fr/vedai/>
7. **Hollander M., Wolfe D. A.** Nonparametric statistical methods. New York, Wiley, 1973.

**В. Я. Распопов**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, tguru@yandex.ru,  
**А. П. Шведов**, канд. техн. наук, доц., tguru@yandex.ru,  
 ФГБОУ ВО "Тульский государственный университет"

## Резервная бесплатформенная система ориентации на отечественных микромеханических инерциальных датчиках

*Обсуждается разработка резервной системы ориентации летательного аппарата на базе отечественных микромеханических инерциальных датчиков. Приводятся результаты испытаний системы на базе ФГУП "ГосНИИАС". Предлагаются проективные зависимости для расчета параметров резервной системы ориентации и способ повышения точности, основанный на анализе режимов движения летательного аппарата.*

**Ключевые слова:** резервирование показаний приборов, инерциальная бесплатформенная вертикаль, микромеханические гироскопы, интегральные акселерометры, акселерометрическая коррекция, фильтр Калмана, оценка погрешности

### Введение

Современные летательные аппараты представляют собой высокоманевренные объекты управления. Автоматизация процесса управления требует определения текущих параметров движения летательного аппарата: скорости, координат, высоты полета, а также его угловой ориентации. Важнейшей является система ориентации, обеспечивающая выработку углов тангажа и крена летательного аппарата, так как данная информация необходима для обеспечения стабилизации летательного аппарата как при равномерном движении, так и при маневрировании.

Одним из способов повышения надежности навигационных приборов является резервирование. К резервным приборам и системам предъявляются жесткие требования по массогабаритным характеристикам и автономности работы. Ввиду большой значимости резервных систем ориентации их разработкой занимаются как в России, так и за рубежом [1–4].

Существенное уменьшение массы и энергопотребления резервных систем может быть достигнуто путем применения микромеханических датчиков угловой скорости (ДУС), которые по указанным параметрам существенно превосходят другие типы, например, роторные или волоконно-оптические гироскопы.

Низкая точность микромеханических датчиков требует применения специальных методов и способов обработки информации, обеспечивающих точность, достаточную для решения задач управления летательным аппаратом.

Следует отметить, что одной из общегосударственных задач является импортозамещение, в том числе в области авиационной техники.

Данная статья посвящена разработке резервной бесплатформенной системы ориентации (РБСО) на отечественной микромеханической элементной базе.

### Постановка задачи

Задача определения ориентации летательного аппарата в микромеханических инерциальных бесплатформенных системах ориентации решается за счет совместного использования двух триад ортогонально расположенных акселерометров и датчиков угловой скорости (микромеханических гироскопов).

Совместное использование датчиков двух типов обусловлено тем, что акселерометры чувствительны к линейным ускорениям, возникающим при движении летательного аппарата, что приводит к возникновению погрешности определения угловой ориентации. Вместе с тем при определении угловой ориентации по микромеханическим гироскопам возникает накапливаемая со временем погрешность.

Таким образом, акселерометры обеспечивают устранение накапливаемой погрешности, а микромеханические гироскопы — снижение влияния динамики движения летательного аппарата на точность системы ориентации.

Эффективным оказывается построение связи между акселерометрами и гироскопами на базе алгоритмов калмановской фильтрации. В частности, в основу РБСО может быть положен фильтр Калмана (ФК), работающий в установившемся режиме работы (рис. 1) [6].

В системе ФК решает следующую задачу: подавляет в векторе кажущегося ускорения  $\mathbf{n}\{n_x, n_y, n_z\}$ , измеряемом акселерометрами  $A_x, A_y, A_z$ , составляющую  $\mathbf{a}$ , описывающую ускоренное движение летательного аппарата, сохраняя при этом вектор ускорения силы тяжести Земли  $\mathbf{g}\{g_x, g_y, g_z\}$ . Таким образом, на выходе ФК формируются проекции вектора  $\mathbf{g}$ , по которым с использованием известных зависимостей [5] вычисляются углы тангажа и крена летательного аппарата.

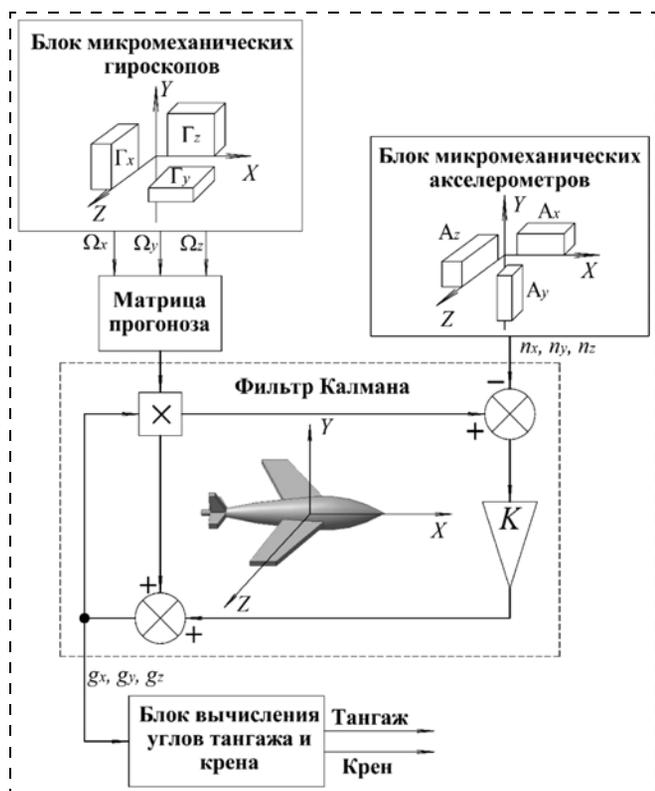


Рис. 1. Структурная схема системы ориентации на базе фильтра Калмана

Эффект оценивания проекции вектора  $\mathbf{g}$  достигается следующим образом. По показаниям  $\Omega_x, \Omega_y$  и  $\Omega_z$  микромеханических гироскопов  $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$  формируется оценка вектора  $\mathbf{g}$  на оси связанной системы координат.

Для того чтобы погрешность вычисления проекций вектора  $\mathbf{g}$  по сигналам гироскопов с течением времени не накапливалась, эти проекции корректируются с малым коэффициентом  $K$  по измеренному акселерометрами вектору кажущегося ускорения  $\mathbf{n}$  [7].

Таким образом, вектор состояния ФК представляет собой проекции вектора  $\mathbf{g}$  на оси связанной системы координат. При этом в процессе расчета фильтра учитывается, что в показаниях акселерометров отсутствуют составляющие, обусловленные ускоренным движением объекта, а систематическая погрешность датчиков блока акселерометров пренебрежимо мала.

Малая чувствительность системы к линейным ускорениям объекта достигается за счет малого значения коэффициента передачи ФК  $K$  в установленном режиме.

Для реализации фильтра необходимо определить коэффициент передачи  $K$ . Анализ работы системы показывает, что ее чувствительность к линейным перегрузкам объекта определяется постоянной времени  $T$ , которая обратно пропорциональна коэффициенту передачи  $K$ . При этом чем больше постоянная времени, тем меньше влияние ускорений на погрешность системы ориентации [7].

Вместе с тем чрезмерное уменьшение значения коэффициента  $K$  приводит к низкой эффективности работы акселерометрической коррекции и недоскомпенсированности погрешностей микромеханических гироскопов.

Таким образом, в работе решается задача определения оптимального значения коэффициента  $K$  с точки зрения точности выработки углов тангажа и крена и обеспечения низкой чувствительности системы ориентации к линейным ускорениям летательного аппарата.

### Определение оптимального значения коэффициента передачи фильтра Калмана

Согласно работам [8, 9] коэффициент  $K$  определяется соотношением

$$K = \frac{p_a + q_a}{p_a + q_a + r_a}, \quad (1)$$

где  $p_a$  — требуемая дисперсия погрешности оценивания вектора  $\mathbf{g}$  (определяется по допустимому значению погрешности вычисления углов тангажа и крена);  $q_a$  — дисперсия погрешности прогноза ФК;  $r_a$  — дисперсия погрешности измерения ФК.

Анализ зависимости (1) показывает, что малое значение коэффициента передачи фильтра Винера  $K$  достигается при малом значении дисперсии погрешности прогноза  $q_a$  и максимально возможном значении дисперсии погрешности измерений  $r_a$ .

В свою очередь, максимальное значение  $r_a$  ограничивается допустимым значением  $p_a$  (рис. 2).

Максимальное значение  $r_a$  для расчета коэффициента передачи  $K$  целесообразно определять по значениям допустимой дисперсии погрешности оценивания  $p_a$  и имеющейся погрешности прогноза  $q_a$  [7]:

$$r_a = \frac{p_a(p_a + q_a)}{q_a}. \quad (2)$$

Таким образом, задача определения оптимального значения коэффициента передачи ФК  $K$  сводится к определению погрешности прогноза  $q_a$ .

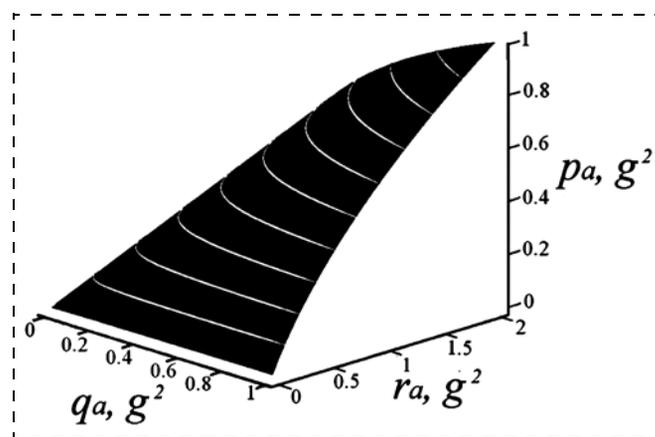


Рис. 2. Зависимость дисперсии погрешности оценивания  $p_a$  от дисперсии погрешностей прогноза  $q_a$  и дисперсии погрешности измерения  $r_a$

Дисперсия погрешности прогноза  $q_a$  определяется среднеквадратическим отклонением погрешности применяемых микромеханических гироскопов  $\sigma$  и значением шага дискретизации системы  $\tau$  [6]. Проведенная серия экспериментальных исследований и результаты полунатурного моделирования показывают, что для расчета дисперсии прогноза может быть использовано соотношение

$$q_a = C\sigma^2\tau^2, \quad (3)$$

где  $C \approx 10^{-2} \frac{g^2}{(\text{с})^2}$  — постоянный коэффициент.

Таким образом, минимальное значение погрешности прогноза может быть достигнуто за счет снижения погрешности микромеханических гироскопов и уменьшения шага дискретизации системы  $\tau$ . Иными словами, чем более точные ДУС и более мощные вычислительные ресурсы привлекаются при построении РБСО, тем меньшее значение принимает дисперсия погрешности прогноза  $q_a$ , а следовательно, и меньшее значение принимает коэффициент передачи  $K$ , при котором обеспечивается наибольшее значение постоянной времени  $T$  и минимальная чувствительность к линейным ускорениям объекта.

### Реализация РБСО и анализ результатов экспериментальных исследований

В ФГБОУ ВО "Тулльский государственный университет" при поддержке АО "ОКБ "Электроавтоматика" имени П. А. Ефимова" была разработана РБСО (рис. 3) и проведены ее испытания в ФГУП "ГосНИИАС".

РБСО содержит три микромеханических гироскопа ММГ-ЭПТРОН (ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор") и три компенсационных акселерометра АТ-1104 (ОАО АНПП "Темп-Авиа"). Выходным интерфейсом модуля является интерфейс RS-232 с частотой передачи данных 1,25 Мбит/с. При этом достигается частота обновления информации об угловой ориентации объекта до 100 раз в

секунду. Масса РБСО составляет порядка 700 г при высоте 80 мм и диаметре 118 мм.

Технические характеристики применяемых гироскопов (табл. 1) позволили обеспечить постоянную времени РБСО порядка 38 с при принятом максимальном значении погрешности по углам тангажа и крена не более  $1^\circ$  в длительном режиме работы. Погрешности акселерометров АТ-1104 приведены в табл. 2.

Система проходила испытания в штатном режиме полета самолета ТУ-160. Испытания РБСО показали, что система работоспособна и устойчиво функционирует при длительных режимах эксплуатации (более 10 ч). По результатам испытаний погрешность РБСО по каналам углов тангажа и крена составила  $2^\circ$  при прямолинейном движении и до  $3^\circ$  при маневрировании. Погрешность угловых скоростей курса, тангажа и крена составила  $2^\circ/\text{с}$  и носила преимущественно шумовой характер.

При проведении работ на стенде СЗ-600 было выявлено влияние рассогласования осей систем координат РБСО и стенда. Помимо постоянной инструментальной погрешности в виде разницы текущих углов тангажа и крена стенда и соответствующих выходных сигналов РБСО наблюдалась переменная составляющая, обусловленная взаимодействием каналов тангажа и крена.

Появление переменной составляющей происходит из-за углов рассогласования осей систем координат (СК) РБСО и стенда  $\Delta\psi$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\gamma$  (рис. 4), так как при вращении стенда по углам тангажа или крена РБСО совершает движение, которое приводит к одновременному изменению углов крена и тангажа.

Взаимовлияние каналов также подтверждается математическим моделированием. На рис. 5 приведены результаты математического моделирования влияния рассогласования СК РБСО и стенда при значении углов:  $\Delta\theta = 0,5^\circ$ ,  $\Delta\gamma = 0,5^\circ$ ,  $\Delta\psi = 5^\circ$ . Из графиков рис. 5 следует, что разница показаний РБСО и угла поворота стенда из-за неточности выставки может достигать двух градусов.

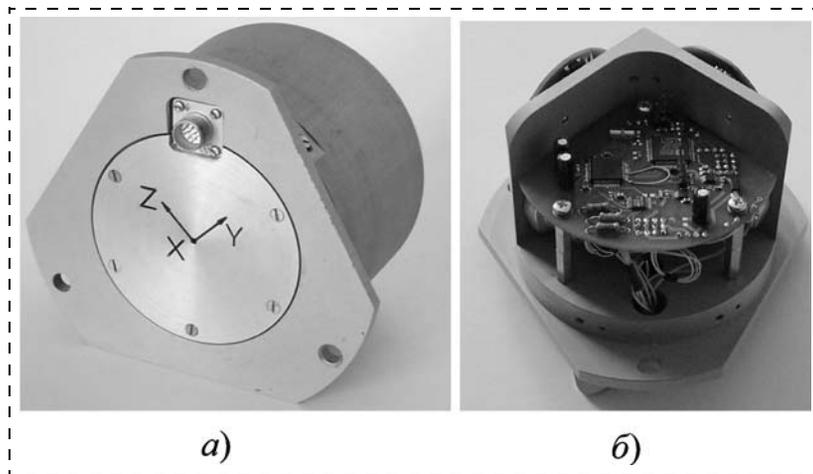


Рис. 3. РБСО:  
а — общий вид; б — вид без крышки

Таблица 1

#### Значения погрешностей гироскопов ММГ-ЭПТРОН по вариациям Алана

Гироскопы	$ARW, \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$	Нестабильность нуля, $^\circ/\text{ч}$
Гироскоп X	13,44	2,17
Гироскоп Y	11,28	2,55
Гироскоп Z	15,92	4,21

Таблица 2

#### Значение погрешностей акселерометров по вариациям Алана

Акселерометры	$VRW, \text{ м/с}^{3/2}$	Нестабильность нуля, $\text{м/с}^2$
Акселерометр X	0,004347	0,001348
Акселерометр Y	0,004036	0,001008
Акселерометр Z	0,003914	0,001258

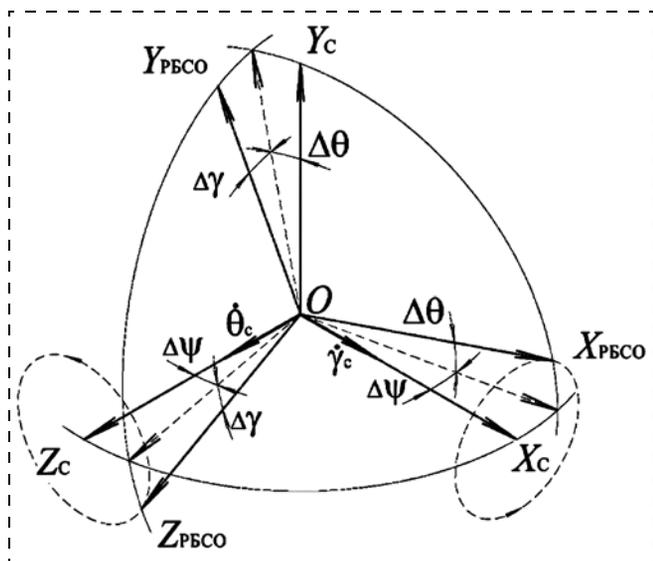


Рис. 4. Взаимная ориентация СК стенда и РБСО:  $Ox_{РБСО}$ ,  $Oy_{РБСО}$ ,  $Oz_{РБСО}$  — продольная, нормальная и поперечная оси СК РБСО;  $Ox_c$ ,  $Oy_c$ ,  $Oz_c$  — продольная, нормальная и поперечная оси СК стенда;  $\Delta\psi$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\gamma$  — рассогласование СК стенда и РБСО по углам курса, тангажа и крена;  $\dot{\theta}_c$ ,  $\dot{\gamma}_c$  — угловые скорости вращения стенда по углам тангажа и крена

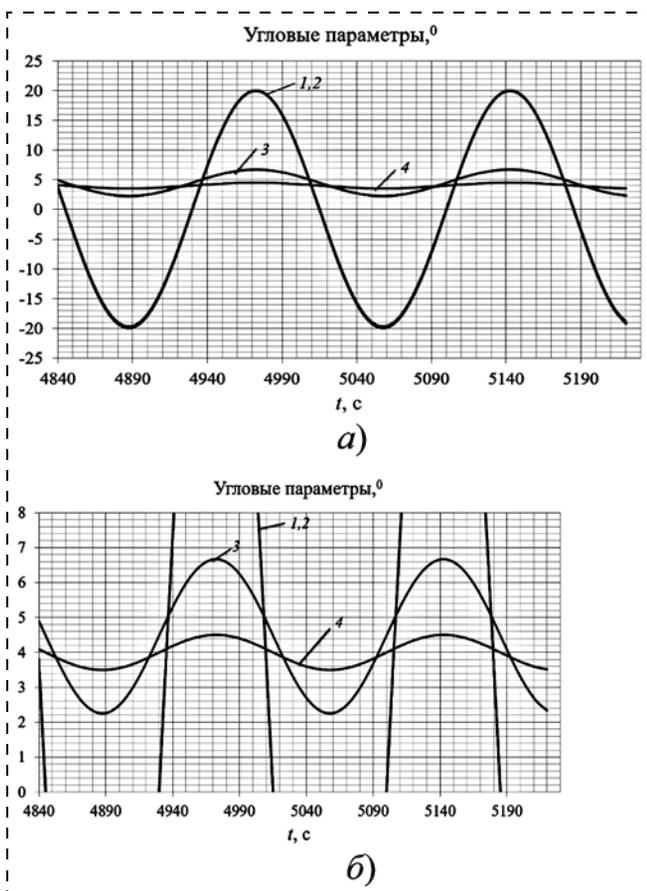


Рис. 5. Влияние рассогласования СК РБСО и стенда: а — график целиком; б — график с увеличением вдоль вертикальной оси (1 и 2 — истинные углы крена стенда и РБСО с учетом рассогласования СК; 3 — истинный угол тангажа РБСО с учетом рассогласования СК; 4 — истинный угол тангажа стенда)

Аналогичная инструментальная погрешность может также присутствовать и на реальном летательном аппарате (ЛА). При этом увеличение требований к точности установки РБСО в ЛА не всегда желательно, так как это осложняется рядом конструктивных и технологических трудностей и приводит к увеличению стоимости конструкции. При этом представляется возможным оценить углы рассогласования по сигналам штатной и резервной систем ориентации и ввести соответствующие поправки в показания РБСО в виде следующей корректирующей матрицы поворота:

$$\Delta C = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta\cos\Delta\psi & \sin\Delta\theta & -\cos\Delta\theta\sin\Delta\psi \\ -\cos\Delta\gamma\sin\Delta\theta\cos\Delta\psi + \sin\Delta\gamma\sin\Delta\psi & \cos\Delta\gamma\cos\Delta\theta & \cos\Delta\gamma\sin\Delta\theta\sin\Delta\psi + \sin\Delta\gamma\cos\Delta\psi \\ \sin\Delta\gamma\sin\Delta\theta\cos\Delta\psi + \cos\Delta\gamma\sin\Delta\psi & -\sin\Delta\gamma\cos\Delta\theta & -\sin\Delta\gamma\sin\Delta\theta\sin\Delta\psi + \cos\Delta\gamma\cos\Delta\psi \end{bmatrix}$$

Результаты испытаний РБСО в динамических режимах движения ЛА показали, что погрешность системы при маневрировании может увеличиваться до  $3^\circ$ , что объясняется влиянием линейных ускорений летательного аппарата.

Как отмечалось, минимальное значение коэффициента передачи ФК  $K$  ограничивается необходимостью обеспечения требуемого уровня компенсации накапливаемой погрешности, возникающей при определении параметров ориентации по микромеханическим гироскопам при длительном функционировании РБСО. При этом уменьшение коэффициента  $K$  до нуля (отключение акселерометрической коррекции) на короткое время не приведет к снижению погрешности РБСО и позволит на некоторое время максимально снизить чувствительность системы к линейным ускорениям летательного аппарата.

Поэтому одним из направлений повышения точности РБСО является отключение режима коррекции от акселерометров при маневрировании ЛА аналогично тому, как это реализуется в классических вертикалях. Рассмотрим влияние динамики полета ЛА на точность работы РБСО.

### Повышение точности определения параметров ориентации при маневрировании

Основным режимом движения ЛА, как правило, является прямолинейный полет с квазипостоянной скоростью. Такой режим возможен только в случае, когда сумма сил, действующих на ЛА, равна нулю. Кажущаяся вертикаль, определяемая акселерометрами, в этом режиме полета соответствует или близка к истинной, поэтому в этом режиме движения отключения коррекции не требуется.

При прямолинейном движении ЛА, как правило, присутствуют участки разгона или торможения (рис. 6).

Как видно из рис. 6, вектор линейного ускорения в этом случае в зависимости от угла атаки  $\alpha$  практически полностью проектируется на продольную ось  $Ox$  связанной СК РБСО.

В связи с этим недостоверными с точки зрения задачи ориентации являются только показания ак-

селерометра по оси  $OX$ . При этом показания акселерометров по осям  $OY, OZ$  можно считать достоверными, и они могут быть использованы для коррекции микромеханических гироскопов.

Вместе с тем проекция вектора  $\mathbf{g}$  на ось  $OX$  легко определяется по двум другим акселерометрам:

$$g_x = \pm \sqrt{g_y^2 - g_z^2} \quad (4)$$

Таким образом, за счет вычисления проекции вектора  $\mathbf{g}$  по выражению (4) контур отключения коррекции для данного режима не требуется. Идентифицировать данный режим возможно по контролируемому значению ускорения ЛА по продольной оси  $OX$  согласно выражению

$$a_x = n_x - g_x, \quad i/i - 1, \quad (5)$$

где  $g_x, i/i - 1$  — прогноз проекции вектора  $\mathbf{g}$  на ось  $OX$ , формируемый с помощью микромеханических гироскопов.

Данный режим отключения коррекции аналогичен контуру отключения продольной радиальной проекции в платформенных гировертикалях.

Разворот ЛА по курсу как при координированном, так и при плоском разворотах сопровождается возникновением угловой скорости рыскания и центростремительного ускорения, зависящего от радиуса разворота (рис. 7).

Как видно из рис. 7, наличие центростремительного ускорения  $\mathbf{a}_c$  приводит к недостоверности, с точки зрения задачи ориентации, показаний акселерометров, ориентированных по осям  $OY$  и  $OZ$ . В свою очередь, показания акселерометра по оси  $OX$  можно считать достоверными.

В этом случае при определении углов тангажа и крена необходимо исключить показания акселерометров по осям  $OY$  и  $OZ$ . Для этого достаточно на период разворота установить коэффициент передачи  $K$  фильтра Калмана по каналам  $OY$  и  $OZ$  равным нулю, а по каналу  $OX$  оставить без изменения.

Идентифицировать данный режим движения можно по значению угловой скорости курса  $\dot{\psi}$ , которая вычисляется РБСО наряду с другими параметрами углового движения ЛА. Данный режим отключения коррекции аналогичен контуру отключения поперечной перпендикулярной коррекции в платформенных гировертикалях.

При развороте ЛА по углу тангажа в вертикальной плоскости, содержащей продольную ось  $OX$ , возникает центростремительное ускорение  $\mathbf{a}_c$ , зависящее от угловой скорости тангажа  $\dot{\theta}$  и радиуса разворота  $R$  (рис. 8). Так как в этом режиме углы атаки и крена, как правило, малы, то недостоверным можно считать только показания акселерометра по оси  $OY$ . Проекция вектора  $\mathbf{g}$  на ось  $OY$  в этом случае может быть определена аналогично режиму разгона и торможения. Таким образом, отключенные коррекции для данного режима не требуются.

При совмещенных, более сложных маневрах ЛА требуется отключение коррекции по всем трем каналам. Идентифицировать указанные режимы

можно по значениям определяемых в РБСО углов и угловых скоростей вращения ЛА.

Результаты моделирования работы РБСО с контуром отключения коррекции и без него (рис. 9) показали, что отключение коррекции позволяет снизить погрешности РБСО при маневрировании ЛА до полутора градусов (рис. 9).

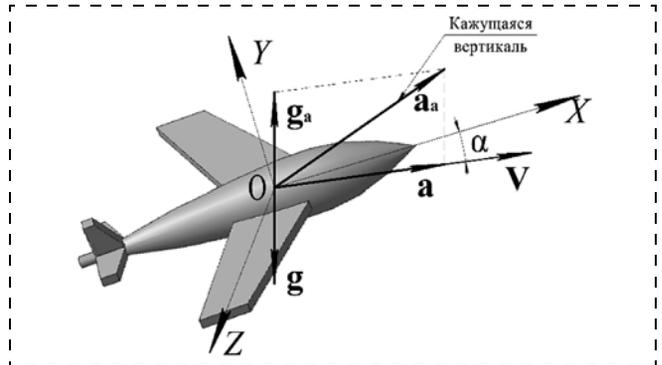


Рис. 6. Режим разгона-торможения ЛА ( $g_a$  — ускорение, создаваемое активными силами, компенсирующими силу тяжести;  $a_a$  — ускорение, создаваемое активными силами;  $a$  — ускорение ЛА;  $\alpha$  — угол атаки;  $V$  — скорость движения ЛА)

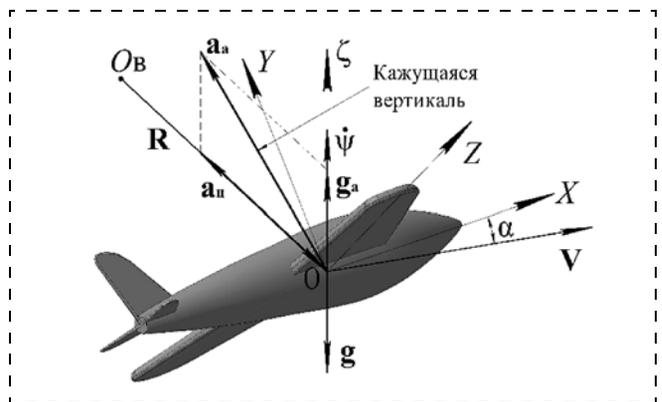


Рис. 7. Разворот ЛА по углу курса (рыскания) ( $g_a$  — ускорение, создаваемое активными силами, компенсирующими силу тяжести;  $a_a$  — ускорение, создаваемое активными силами;  $a_c$  — центростремительное ускорение ЛА;  $\alpha$  — угол скольжения;  $V$  — скорость движения ЛА;  $R$  — радиус разворота)

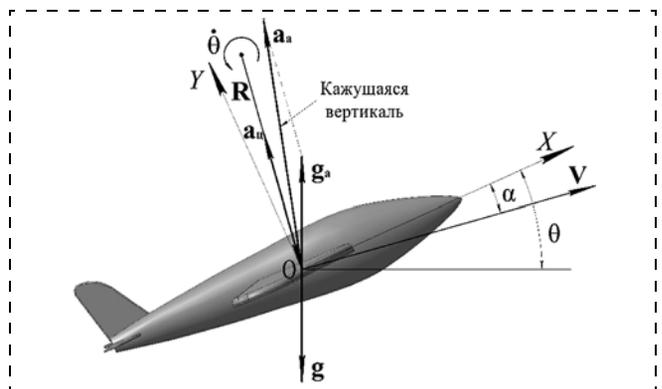


Рис. 8. Разворот по углу тангажа ( $g_a$  — ускорение, создаваемое активными силами, компенсирующими силу тяжести;  $a_a$  — ускорение, создаваемое активными силами;  $a_c$  — центростремительное ускорение ЛА;  $\alpha$  — угол скольжения;  $V$  — скорость движения ЛА;  $R$  — радиус разворота)

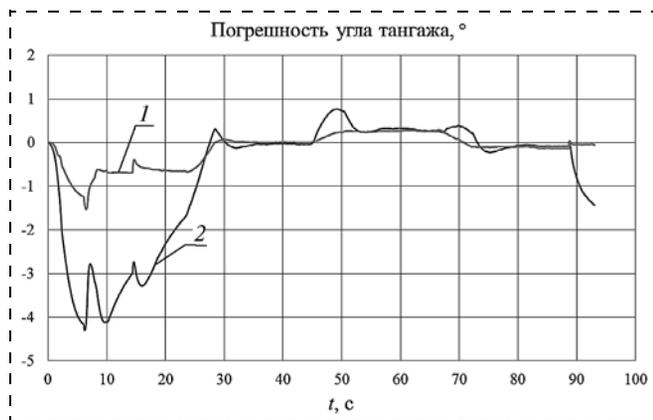


Рис. 9. Погрешности угла тангажа: 1 — РБСО с отключением коррекции; 2 — РБСО без отключения коррекции

Таким образом, калмановская фильтрация и режимы прогнозируемого отключения коррекции позволяют повысить точность определения параметров ориентации с помощью РБСО при маневрировании ЛА.

### Заключение

Рассмотрен вариант построения РБСО на базе ФК, работающего в установившемся режиме. Показано, что для реализации ФК необходимо определить только его коэффициент передачи  $K$ , который должен иметь минимально возможное значение в целях обеспечения низкой чувствительности РБСО к линейным ускорениям ЛА.

Приведенные в работе проекторочные зависимости позволяют оценить точность РБСО еще на этапе ее проектирования, и из них следует также, что минимальное значение коэффициента передачи  $K$  ограничивается погрешностями гироскопов и шагом дискретизации. По этой причине значение имеют не только точностные характеристики применяемых гироскопов и акселерометров, но и параметры электронно-преобразующего тракта и бортового вычислителя.

В случаях, когда чувствительность РБСО к динамике полета летательного аппарата оказывается недостаточной, повышение точности РБСО при маневрировании ЛА может быть достигнуто за счет кратковременного отключения контура коррекции от акселерометров с учетом режимов движения ЛА.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что особое внимание необходимо уделять позиционированию СК РБСО относительно СК, связанной с ЛА. В статье предложен способ позиционирования, позволяющий существенно снизить требования по установке РБСО за счет алгоритмического учета рассогласования осей СК РБСО и ЛА.

Полученные результаты показали возможность построения РБСО на отечественных инерциальных микромеханических датчиках, обладающей приемлемой точностью для решения задач управления ЛА.

### Список литературы

1. Ильясов С. П., Корнилов А. В., Свяжин Д. В. Использование функциональной избыточности как средства повышения надежности резервной системы ориентации летательного аппарата // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2014. № 1. С. 89—92.
2. Каталог продукции ПАО АНПП "Темп-Авиа". URL: <http://www.temp-avia.ru/index-4.htm>.
3. Savage P. G. Blazing gyros — the evolution of strapdown inertial navigation technology for aircraft // AIAA J. Guidance, Control, and Dynamics. 2013. Vol. 36, N. 3. P. 637—655. doi: 10.2514/1.60211
4. A Study of Critical Computational Problems Associated with Strapdown Inertial Navigation Systems, NASA Report CR-968, April 1968.
5. Гироскопические приборы и системы: Учеб. для вузов / Д. С. Пельпор, И. А. Михалев, В. А. Бауман и др. М.: Высшая школа, 1988. 424 с.
6. Шведов А. П. Способы повышения точности информационно-измерительных систем ориентации подвижных объектов: Дисс... на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.11.16 / А. П. Шведов. ГОУ ВПО "Тульский государственный университет". Тула: Изд. ТулГУ. 2010. 172 с.
7. Алалуев Р. В., Ладонкин А. В., Малютин Д. М. и др. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 2011. 180 с.
8. Распопов В. Я. Микросистемная авионика: учебное пособие. Тула: Гриф и К, 2010. 248 с.
9. Распопов В. Я., Иванов Ю. В., Алалуев Р. В., Шукалов А. В., Шведов А. П. Влияние параметров датчиков на точность работы бесплатформенной инерциальной гировертикали // Датчики и системы. 2011. № 8. С. 18—21.

## Backup Platformless Orientation System Based on Domestic Micromechanical Inertial Sensors

V. Ya. Raspopov, [tgupu@yandex.ru](mailto:tgupu@yandex.ru), A. P. Shvedov, [tgupu@yandex.ru](mailto:tgupu@yandex.ru), FSBEI HE "Tula State University", Tula, Russian Federation

Corresponding autor: Raspopov Vladimir Ya., D. Sc., Professor, Head of the Chair, FSBEI HE "Tula State University", Tula, Russian Federation, e-mail: [tgupu@yandex.ru](mailto:tgupu@yandex.ru)

Received on April 26, 2017

Accepted on May 15, 2017

The work is devoted to the problem of development of backup strapdown attitude control system (BSACS) based on micromechanical sensors. A block diagram is proposed for constructing a system based on micromechanical accelerometers and gyros whose complex processing of signals is realized by means of a Kalman filter operating in steady state. Dependencies of the filter parameters on the accuracy of the sensors used are shown. The design relationships are given, which allow us to calculate the filter parameters by the technical characteristics of the sensors used. The work presents a study of the inertial measurement module,

based on micromechanical gyroscopes MMG-APTRON (Central Research and Development Institute Electropribor Corporate Group JSC), ADXRS-642 (Analog Devices Co.) and compensation accelerometers AT1104 (ANPP Temp-Avia JSC). There presented the design of the measurement module for the construction of a backup strapdown attitude control system, which may be applied both on unmanned aerial vehicles and as a backup system on piloted aircrafts. The results of tests of the developed system based on FSUE "GosNiI AS" are given, which showed that BSACS provides pitch and pitch angles with an error of no more than 2 degrees with a straight flight and no more than 3 when maneuvering. The influence of the misalignment of the BSACS axes and the mobile object on the accuracy of the development of angular parameters is shown. A method for algorithmically accounting for axial misalignment is proposed, which makes it possible to reduce the requirements for the accuracy of alignment of the axes. The reasons for the increase in the BSACS error during maneuvering are shown. A method for increasing the accuracy of a system based on an analysis of the modes of motion of an aircraft is proposed. The results of modeling the method of increasing the accuracy are given, which show that the error of BSACS during maneuvering, in some cases, can be reduced by more than 3 times.

**Keywords:** instrument redundancy, inertial platformless gyrovertical, MEMS-gyroscopes, integrated accelerometer, accelerometer correction, Kalman filter, error estimation

For citation:

Raspopov V. Ya., Shvedov A. P. Backup Platformless Orientation System Based on Domestic Micromechanical Inertial Sensors, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 699–705.

DOI: 10.17587/mau.18.699-705

#### References

1. Kornilov A. V., Ilyasov S. P., Svyazhin D. V. *Ispolzovanie funktsionalnoy izbyitochnosti kak sredstva povysheniya nadezhnosti rezervnoy sistemy orientatsii letatel'nogo apparata* (The use of functional redundancy as a means of increasing the reliability of the reserve orientation system of an aircraft), *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya*, 2014, no. 1, pp. 89–92 (in Russian).

2. Production of ANPP Temp-Avia JSC, available at: <http://www.temp-avia.ru/index-4.htm> (in Russian).

3. Savage P. G. Blazing gyros — the evolution of strapdown inertial navigation technology for aircraft, *AIAA J. Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 36, no. 3, pp. 637–655, 2013. doi: 10.2514/1.60211

4. A Study of Critical Computational Problems Associated with Strapdown Inertial Navigation Systems, NASA Report CR-968, April 1968.

5. Pelpor D. S. et al. *Gyroscopicheskie pribory i sistemy* (Gyroscopic devices: study aid), Moscow, Vysshaya shkola, 1988, 424 p. (in Russian).

6. Shvedov A. P. *Sposoby povysheniya tochnosti informacionno-izmeritel'nykh sistem orientatsii podvinykh ob'ektov. Kand. Diss.* (The ways to improve the accuracy of information-measuring system for movable object), Tula, 2010, 172 p. (in Russian).

7. Alaluev R. V. et al. *Microsistemy orientatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov* (Microsystems of orientation of unmanned aerial vehicles), Moscow, Mashinostroenie, 2011, 180 p. (in Russian).

8. Raspopov V. Ya. *Mikrosistemnaya avionika: uchebnoye posobiye* (Microsystem aviation electronics: study aid), Tula, Grif i K, 2010 (in Russian).

9. Raspopov V. Ya., Ivanov Yu. V., Alaluev R. V., Shukalov A. V., Shvedov A. P. *Vliyaniye parametrov datchikov na tochnost' raboty besplatformennoy inertsiyal'noy girovertikali* (Influence of the parameters of the sensors on the accuracy of the work of the inertial inertial gyrovertical), *System and Sensors*, 2011, no. 8, pp. 18–21 (in Russian).

10. Raspopov V. Ya., Ivanov Yu. V., Alaluev R. V., Shukalov A. V., Shvedov A. P. *Vliyaniye parametrov datchikov na tochnost' raboty besplatformennoy inertsiyal'noi girovertikali* (Influence of the sensor parameters on the accuracy of the inertial-free inertial gyrovertical), *Datchiki i Sistemy*, 2011, no. 8, pp. 18–21 (in Russian).

УДК 629.73.018.7

DOI: 10.17587/mau.18.705-711

О. Н. Корсун, д-р техн. наук, проф., marmotto@rambler.ru,

А. В. Стуловский, инженер, avstlv2@gmail.com,

Государственный НИИ авиационных систем, г. Москва,

А. В. Канышев, нач. отд., astra\_kanysheva@mail.ru,

Государственный летно-испытательный центр им В. П. Чкалова, г. Ахтубинск

## Анализ движения самолетов на закритических углах атаки: коррекция погрешностей бортовых измерений и моделирование отклоняемого вектора тяги\*

Рассмотрена проблема анализа полетных данных на закритических углах атаки в целях уточнения математической модели движения самолета. В рамках указанной общей проблемы предлагается методика проверки и коррекции бортовых измерений при движении летательного аппарата в диапазоне закритических углов атаки. Поскольку на исследуемых режимах полета применяются двигатели с отклоняемым вектором тяги, рассмотрена математическая модель сил и моментов, возникающих при отклонении вектора тяги. Работоспособность предложенных моделей и методов подтверждена на примерах обработки данных летных испытаний современных маневренных самолетов.

**Ключевые слова:** летные испытания, идентификация аэродинамических коэффициентов, проверка согласованности бортовых измерений, отклоняемый вектор тяги, закритические углы атаки, сверхманевренность

### Введение

Режимы сверхманевренности, при выполнении которых самолет находится на закритических углах атаки, были реализованы для ряда летательных аппаратов (ЛА) в последние десятилетия XX века.

Однако задача моделирования динамики на этих сложных режимах сохраняет актуальность и в настоящее время. При этом одним из основных путей уточнения математической модели движения самолета является идентификация аэродинамических коэффициентов по данным летных испытаний, что требует разработки соответствующего алгоритмического и методического обеспечения. Необходи-

\* Работа поддержана РФФИ, проект 17-08-00856-а.

мым этапом при анализе полетных данных является проверка правильности бортовых измерений, получаемых в летном эксперименте.

В настоящее время для традиционного эксплуатационного диапазона углов атаки имеется значительный задел как в решении задач идентификации аэродинамических параметров [1–7], так и в области проверки достоверности бортовых измерений [8–13]. Известны также публикации, в которых уточненные методами идентификации модели применяются для решения различных прикладных задач [14–16]. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы предложить алгоритмические и методические подходы к анализу полетных данных на режимах сверхманевренности, основанные на результатах, полученных при решении аналогичной задачи для эксплуатационного диапазона значений углов атаки. Построение и идентификация модели движения самолета на закритических углах атаки представляет собой сложный многоэтапный процесс, как и в случае традиционных режимов полета [3, 4, 7, 11, 12]. В рамках данной статьи рассматриваются два этапа, которые абсолютно необходимы для анализа режимов сверхманевренности: уточнение данных бортовых измерений на закритических углах и расчет сил и моментов, возникающих при отклонении сопел двигателей.

#### Согласование полетных данных и математической модели

Одним из методов уточнения опытных данных является согласование результатов летных испытаний с данными, полученными с помощью математической модели движения ЛА [1, 3, 4]. Примеры использования данного подхода в традиционном эксплуатационном диапазоне докритических углов атаки представлены, в частности, в работах [11, 12].

Перейдем к рассмотрению математической модели. Для поставленной задачи исследования динамики ЛА хорошо подходит система, состоящая из следующих пяти уравнений [17]:

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= \omega_z - \frac{1}{\cos\beta} \left[ \left( \frac{a_x}{V} - \omega_y \sin\beta \right) \sin\alpha + \right. \\ &+ \left. \left( \frac{a_y}{V} + \omega_x \sin\beta \right) \cos\alpha \right]; \\ \frac{d\beta}{dt} &= \frac{a_z}{V} \cos\beta - \left( \frac{a_x}{V} \sin\beta - \omega_y \right) \cos\alpha + \left( \frac{a_y}{V} \sin\beta + \omega_x \right) \sin\alpha; \\ \frac{dV}{dt} &= a_x \cos\alpha \cos\beta - a_y \sin\alpha \cos\beta + a_z \sin\beta; \\ \frac{d\vartheta}{dt} &= \omega_y \sin\gamma + \omega_z \cos\gamma; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega_x - \operatorname{tg}\vartheta (\omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\alpha, \beta$  — углы атаки и скольжения, рад;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  — угловые скорости относительно связанных осей, рад/с;  $\vartheta, \gamma$  — углы тангажа, крена, рад;  $V$  — скорость полета, м/с;  $H$  — высота полета, м;  $a_x, a_y, a_z$  — ускорения вдоль связанных осей, м/с<sup>2</sup>.

Удобство уравнений (1) заключается в том, что они представляют собой систему, входными сигналами которой являются проекции ускорений и угловых скоростей на оси связанной системы координат. Эти сигналы допустимо принять известными функциями времени, поскольку угловые скорости в полете непосредственно измеряются бортовыми датчиками, а значения ускорений легко получить из значений перегрузок в связанной системе координат по известным формулам [12, 17].

Для исключения возможных расходящихся трендов при численном интегрировании системы (1) предположим, что измеренные в летном эксперименте значения перегрузок и угловых скоростей содержат систематические погрешности, постоянные на рассматриваемом участке полета. Чтобы определить значения этих констант, решим задачу минимизации функционала, представляющего собой сумму квадратов разностей между значениями углов атаки, скольжения, тангажа, крена и скорости, получаемыми в математической модели и от бортовой системы измерений и регистрации. В качестве оценок указанных погрешностей измерения перегрузок и угловых скоростей примем значения, доставляющие минимум такому функционалу.

Минимизировать функционал можно с помощью различных методов численной оптимизации. Как правило, в подобных задачах применяется модифицированный метод Ньютона [1, 6, 7, 13] в векторно-матричной форме, а уравнения движения (1) решаются методом Рунге—Кутты 4-го порядка. В данной работе в порядке эксперимента были использованы относительно простые алгоритмы: интегрирование выполнялось методом Эйлера, а оптимизация — методом покоординатного спуска, в котором частные задачи однопараметрической оптимизации решались методом половинного деления. Сравнение с более сложными и более точными алгоритмами Ньютона и Рунге—Кутты показало высокую степень совпадения результатов.

#### Проверка правильности регистрации полетных данных

При применении описанной выше методики к участку, на котором ЛА движется, находясь в пределах области эксплуатационных значений угла атаки, как и в работах [6, 7, 11], была получена высокая степень соответствия данных испытаний и модели. Сравнение этих результатов показано на рис. 1 (см. вторую сторону обложки).

Как можно видеть, данные хорошо согласуются между собой для всего набора сравниваемых сигналов.

Если же рассмотреть участок полета, на котором значения угла атаки ЛА превышают критическое значение, то результат претерпевает изменения. Значения углов тангажа и крена продолжают демонстрировать хорошую степень совпадения. В то же время между значениями угла атаки и скорости, получаемыми из полетных данных и математической модели, наблюдаются заметные расхождения, что легко увидеть на рис. 2 (см. вторую сторону обложки).

Полученный результат является закономерным, поскольку, как известно из аэродинамики [17], на закритических углах атаки характер обтекания принципиально изменяется и оказывает влияние на погрешности аэрометрических измерений, к которым относятся угол атаки и воздушная скорость. Известно также, что погрешности измерения воздушной скорости существенно возрастают при малых скоростях полета. В данном случае это соответствует скоростям 40...60 м/с.

Поэтому разумно предположить, что именно данные, полученные при моделировании, более объективно отображают суть происходящих процессов. Рассмотрим подробнее аргументы в пользу этого на примере угла атаки. Если рассмотреть изменение угла атаки во времени (рис. 2, а), то можно заметить, что его значения по данным бортовых измерителей ограничены сверху (примерно 50°). При подходе к границе диапазона показания прибора начинают колебаться. В противоположность этому, по данным моделирования на этом участке траектории наблюдается сначала продолжение роста, а затем уменьшение значений угла атаки. Необходимо отметить, что за пределами этого участка полетные данные и данные модели с хорошей точностью воспроизводят друг друга. Вместе с тем, известно, что на рассматриваемом самолете используемые датчики угла атаки имеют физические ограничения именно при значениях около 50°. Таким образом, допустимо предположить, что в бортовых измерениях имеет место погрешность, обусловленная ограничением хода чувствительного элемента датчика, тогда как в математической модели такая погрешность отсутствует.

Поскольку угол атаки является одним из важнейших параметров полета, рассмотрим дополнительно аргументы аэродинамического характера.

Для этого по имеющимся полетным данным найдем оценку зависимости коэффициента подъемной силы  $c_{ye}$  в полусвязанной системе координат [18] от угла атаки. Саму оценку значения коэффициента подъемной силы можно вычислить по формуле [6, 11, 12]

$$c_{ye}(t_i) = \frac{(n_y(t_i)\cos\alpha(t_i) + n_x(t_i)\sin\alpha(t_i))mg - P\sin(\alpha(t_i) + \varphi_{дв})}{qS}. \quad (2)$$

В выражении (2) используются следующие обозначения:

$\alpha$  — угол атаки, рад;  $m$  — масса самолета, кг;  $S$  — эквивалентная площадь крыла, м<sup>2</sup>;  $q = \rho_H V^2/2$  — скоростной напор, Па;  $\rho_H$  — плотность воздуха на высоте полета, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — скорость полета, м/с;  $n_x$ ,  $n_y$  — перегрузки вдоль осей связанной системы координат;  $P$  — тяга двигателя, Н;  $\varphi_{дв}$  — угол установки двигателя, рад.

С учетом специфики рассматриваемой задачи здесь угол  $\varphi_{дв}$  рассчитывался с учетом угла отклонения сопел двигателя.

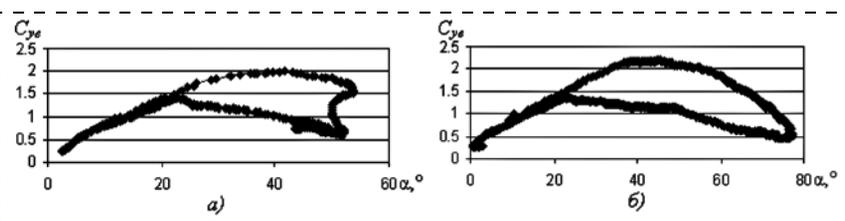


Рис. 3. Зависимость значений коэффициента подъемной силы от значений угла атаки: а — угол атаки принят по бортовым измерениям; б — угол атаки скорректирован с помощью модели

Зависимость коэффициента подъемной силы  $c_{ye}$  от значений угла атаки, измеренных в полете, представлена на рис. 3, а.

График на рис. 3, а имеет характерную особенность на углах атаки около 50°, когда коэффициент подъемной силы значительно изменяется при почти постоянном угле атаки.

Если применить при вычислении значений  $c_{ye}$  и при построении графика значения угла атаки и воздушной скорости, полученные при интегрировании модели (1), то зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки примет вид, представленный на рис. 3, б.

Из аэродинамики известно [17], что на закритических углах атаки в графике коэффициента подъемной силы проявляется гистерезис вследствие несимметричности срыва и восстановления воздушного потока при возрастании и уменьшении угла атаки. В то же время на докритических углах коэффициент подъемной силы является приблизительно однозначной функцией. Именно эту картину мы и видим на обоих графиках. Вместе с тем, сведения из аэродинамики не содержат никаких указаний на особую точку вблизи 50°. Поэтому наиболее обоснованным представляется вывод, что относительно гладкая двузначная функция на рис. 3, б описывает аэродинамический гистерезис, а скачкообразное изменение графика на рис. 3, а обусловлено погрешностями бортовых измерений угла атаки, обнаруженными выше с помощью принципиально иного подхода.

Таким образом, рассмотренная методика позволяет находить и корректировать погрешности полетных данных, прежде всего в части аэрометрических сигналов.

Существенное повышение точности измерений углов атаки и воздушной скорости можно обеспечить при идентификации скорости ветра на обрабатываемом участке полета. Соответствующая методика представлена в работе [13]. Для ее применения требуется выполнение в полете дополнительных тестовых режимов, поэтому в данной статье этот подход не рассматривался.

Необходимо также отметить, что применение моделей становится возможным, если известно направление вектора тяги двигателя. Соответствующий расчет для режимов сверхманевренности обладает важной отличительной особенностью — необходимостью учитывать отклонения сопел двигателя. В завершающих разделах статьи выводятся формулы, позволяющие учесть изменение направления тяги и рассчитать проекции возникающих при этом сил и моментов.

## Моделирование сил и моментов тяги, создаваемых двигателем с отклоняемым вектором тяги

Для расчета момента, создаваемого отклонением сопел двигателя, предлагается воспользоваться стандартной формулой момента

$$\mathbf{M} = [\mathbf{r}_i \times \mathbf{P}],$$

где  $\mathbf{r}_i^T = (x \ y \ z_i)$  — радиус-вектор из центра масс в центр сечения сопла  $i$ -го двигателя в нейтральном положении;  $\mathbf{P}$  — вектор тяги.

Расписав моменты покомпонентно, получим

$$\begin{aligned} M_x &= y(P_{z1} + P_{z2}) - z_1 P_{y1} - z_2 P_{y2}; \\ M_y &= z_1 P_{x1} + z_2 P_{x2} - x(P_{z1} + P_{z2}); \\ M_z &= x(P_{y1} + P_{y2}) - y(P_{x1} + P_{x2}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $P_{xi}$ ,  $P_{yi}$ ,  $P_{zi}$  — модули проекции тяги  $i$ -го двигателя на оси связанной системы координат.

Следующим шагом становится получение значений проекций тяги. Прежде чем переходить непосредственно к рассмотрению моделей, описывающих поворот вектора тяги, оговоримся, что в данной статье не рассматривается вклад входного импульса. Это связано с тем, что его расчет для самолетов на режимах сверхманевренности не имеет существенных отличий по сравнению с традиционными режимами. Поэтому далее под вектором тяги понимается вектор выходного импульса.

Как известно, для задания направления на точку в трехмерном пространстве достаточно двух углов. Один из способов задания изображен на рис. 4, где угол между горизонтальной плоскостью и вектором обозначен  $\varphi$ , а угол между проекцией вектора на горизонтальную плоскость и продольной осью —  $\psi$ . Тогда проекции вектора тяги  $\mathbf{P}$ ,  $|\mathbf{P}| = P$  на оси связанной системы координат запишутся в виде

$$\begin{aligned} P_x &= P \cos \varphi \cos \psi; \\ P_y &= P \sin \varphi; \\ P_z &= P \cos \varphi \sin \psi. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражения (4) позволяют описывать поворот линии действия тяги. При этом предполагается, что сопла способны совершать повороты в вертикальной и горизонтальной плоскостях независимо друг от друга. Для получения момента, генерируемого вследствие отклонения сопел, достаточно подставить значения проекций (4) в формулы моментов (3).

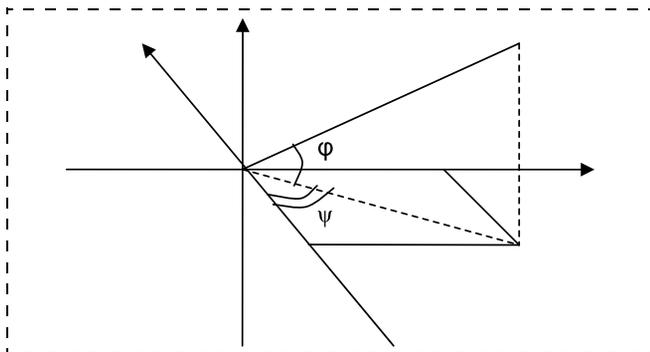


Рис. 4. Один из возможных способов задания направления в трехмерном пространстве

На практике сопла двигателя с отклоняемым вектором тяги часто способны поворачиваться только в одной плоскости, которая находится под некоторым углом к вертикали, чтобы при отклонении создавать моменты относительно всех трех осей связанной системы координат. Опишем возможный способ перехода от такой модели к уравнениям (4).

**Вектор, вращающийся в плоскости.** Предположим, что сопло совершает повороты в некоторой плоскости, отклоненной относительно нормальной плоскости на известный угол  $\chi$ . Угол поворота в плоскости обозначим  $\eta$ . Пусть в исходном положении сопло параллельно продольной оси.

Проведем ось, проходящую через центр сечения сопла, находящегося в нейтральном положении, параллельную оси симметрии ЛА. Назовем ее осью сопла в нейтральном положении, обозначим штрихпунктирной линией и выберем на ней две точки,  $A$  и  $O$ . Пусть  $O$  — точка, относительно которой осуществляется поворот сопла, тогда  $A$  соответствует центру сечения сопла. Построим две плоскости, содержащие в себе прямую  $AO$ : вертикальную плоскость и плоскость, образующую с вертикальной углом  $\chi$ , — плоскость поворота сопла. Результат описанного построения приводится на рис. 5.

Пусть сопло повернуто на угол  $\eta$ . Обозначим  $C$  точку пересечения оси сопла при повороте на угол  $\eta$  с плоскостью сечения сопла в нейтральном положении. Из точки  $C$  опустим перпендикуляр  $CD$  на горизонтальную плоскость.

Установим геометрические соотношения, связывающие углы  $\psi$  и  $\varphi$  с углами  $\eta$  и  $\chi$ . Сначала выведем зависимость угла  $\psi$  от углов  $\eta$  и  $\chi$ . Воспользовавшись тем, что треугольники  $AOD$  и  $AOC$  прямоугольные, можем записать:

$$\begin{aligned} AC &= AO \operatorname{tg} \eta, \\ AD &= AO \operatorname{tg} \psi. \end{aligned}$$

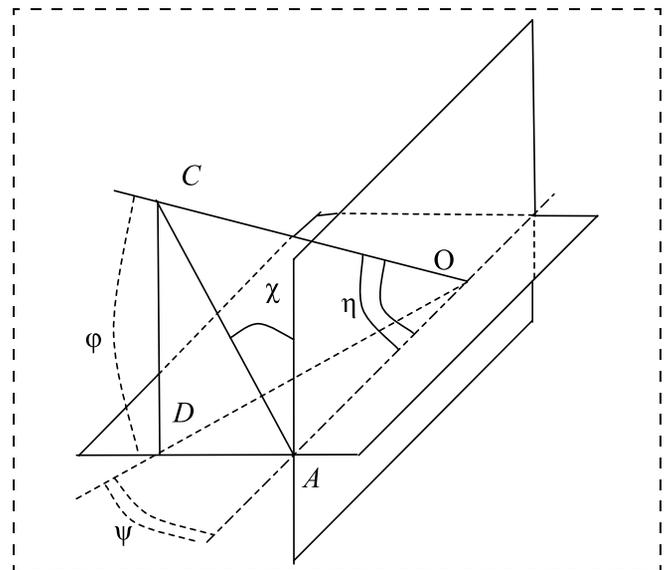


Рис. 5. Схематическое отображение связи между парами углов  $\chi$ ,  $\eta$  и  $\psi$ ,  $\varphi$

В свою очередь, так как треугольник  $ADC$  прямоугольный, справедливо отношение  $\sin\chi = AD/AC$ . Поэтому

$$\operatorname{tg}\psi = \operatorname{tg}\eta\sin\chi.$$

Выведем теперь зависимость угла  $\varphi$  от углов  $\eta$  и  $\chi$ . Воспользовавшись тем, что треугольники  $CDO$  и  $AOC$  прямоугольные, можем записать

$$\begin{aligned} AC &= OC\sin\eta, \\ CD &= OC\sin\varphi. \end{aligned}$$

В свою очередь, так как треугольник  $ADC$  прямоугольный, справедливо отношение  $\cos\chi = CD/AC$ . Поэтому

$$\sin\varphi = \sin\eta\cos\chi.$$

Тогда значения углов  $\psi$ ,  $\varphi$  могут быть определены по значениям углов  $\chi$ ,  $\eta$  с использованием формул следующего вида:

$$\begin{aligned} \psi &= \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\eta\sin\chi), \\ \varphi &= \operatorname{arcsin}(\sin\eta\cos\chi). \end{aligned} \quad (5)$$

Знание значений пары углов  $\chi$  и  $\eta$ , а также применение модели расчета тяги двигателя позволяет с помощью формул (3)—(5) найти моменты, создаваемые отклонением сопел.

Теперь рассмотрим подробнее проекции тяги, получаемые в результате проецирования на оси связанной системы координат. Применим к углам  $\chi$  и  $\eta$  общие правила определения знаков, применяемые к органам управления самолета [18].

В таком случае, предполагая, что положение плоскостей поворота двигателей соответствует рис. 6, получим, что для правого двигателя  $\chi_1 > 0$ , а для левого  $\chi_2 < 0$ . Угол  $\eta$  же будет иметь положительное значение при отклонении сопла вниз и отрицательное — при его отклонении вверх.

Предположим, что сопла обоих двигателей отклонены вверх. Если воспользоваться формулами пересчета углов  $\chi$  и  $\eta$  в углы  $\psi$  и  $\varphi$  (5), то знак угла  $\varphi$  будет в обоих случаях отрицательным, в то время как угол  $\psi$  будет отрицательным для правого двигателя и положительным для левого. Результатом будет являться тот факт, что оба двигателя будут создавать проекции тяги одного знака на продольную ось (положительного) и нормальную ось (отрицательного). Проекции на поперечную ось будут разного знака — положительные для левого двигателя и отрицательные для правого.

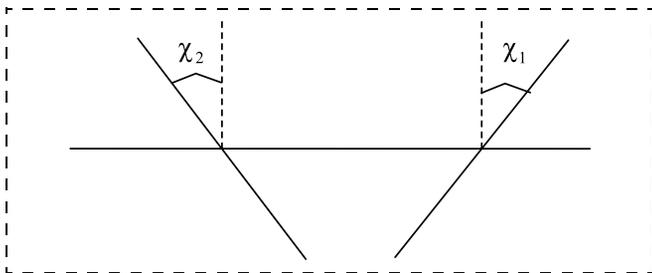


Рис. 6. Схематическое изображение плоскостей поворота сопел двигателей, вид с хвоста самолета

Теперь предположим, что сопла обоих двигателей отклонены вниз. Получим, что угол  $\varphi$  положительный в обоих случаях, а угол  $\psi$  положителен для правого двигателя и отрицателен для левого. В таком случае, оба двигателя создают положительные проекции тяги на продольную и нормальную оси. Правый двигатель создает положительную проекцию тяги на поперечную ось, а левый — отрицательную.

Полученные результаты соответствуют представлению о направлении проекций сил тяги при повороте двигателя. Таким образом, подтверждается справедливость распространения установленного правила знаков на углы  $\chi$ ,  $\eta$ .

Достоинство приведенного выше способа вычисления проекций тяги заключается в его вычислительной простоте и наглядности, поскольку он основан на элементарных геометрических соображениях. Для дополнительной проверки полученных результатов рассмотрим более общий способ нахождения проекций тяги.

**Произвольно направленный вектор тяги.** Для описания поворота сопел можно воспользоваться формулой Родрига, известной из теоретической механики, которая описывает поворот вектора вокруг произвольного единичного вектора, когда оба вектора отложены от одной точки [19].

Пусть единичный вектор  $\mathbf{v}$  задает направление тяги двигателя при нейтральном положении сопла в связанной системе координат. Пусть вектор  $\mathbf{e}$  задает ось поворота двигателя в связанной системе координат, а угол  $\eta$  — угол поворота сопла в плоскости. Рассматриваемое преобразование поворота запишется в виде:

$$\mathbf{v}_1 = (\mathbf{e} \cdot \mathbf{v})\mathbf{e} + [[\mathbf{e} \times \mathbf{v}]](\mathbf{e}_1 \cos\eta + \mathbf{e}_2 \sin\eta),$$

где  $\mathbf{e}_1$  и  $\mathbf{e}_2$  составляют с  $\mathbf{e} = \mathbf{e}_3$  правосторонний базис и задаются формулами

$$\mathbf{e}_1 = \frac{[\mathbf{e} \times [\mathbf{v} \times \mathbf{e}]]}{|[\mathbf{e} \times \mathbf{v}]|}, \quad \mathbf{e}_2 = \frac{[\mathbf{e} \times \mathbf{v}]}{|[\mathbf{e} \times \mathbf{v}]|}.$$

В приведенной формуле первое слагаемое соответствует составляющей вектора  $\mathbf{v}$  параллельной оси вращения, а второе — перпендикулярной составляющей. Расписав  $\mathbf{e}_1$  и  $\mathbf{e}_2$  и раскрыв скобки, получим

$$\mathbf{v}_1 = (\mathbf{e} \cdot \mathbf{v})\mathbf{e} + [\mathbf{e} \times [\mathbf{v} \times \mathbf{e}]]\cos\eta + [\mathbf{e} \times \mathbf{v}]\sin\eta.$$

Если воспользоваться формулой двойного векторного произведения, то направление тяги двигателя при повороте сопла можно будет записать в следующем виде:

$$\mathbf{v}_1 = (\cos\eta)\mathbf{v} + (\sin\eta)[\mathbf{e} \times \mathbf{v}] + (1 - \cos\eta)(\mathbf{e} \cdot \mathbf{v})\mathbf{e}.$$

Зная координаты вектора направления тяги в связанной системе координат, для получения проекций тяги достаточно умножить этот вектор на модуль тяги:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} = |\mathbf{P}| \cdot \mathbf{v}_1.$$

Расписав это выражение покомпонентно, получим

$$\begin{aligned} P_x &= |\mathbf{P}|(v_x \cos \eta + (e_y v_z - e_z v_y) \sin \eta + \\ &+ (1 - \cos \eta)(\mathbf{e} \cdot \mathbf{v}) e_x); \\ P_y &= |\mathbf{P}|(v_y \cos \eta + (e_z v_x - e_x v_z) \sin \eta + \\ &+ (1 - \cos \eta)(\mathbf{e} \cdot \mathbf{v}) e_y); \\ P_z &= |\mathbf{P}|(v_z \cos \eta + (e_x v_y - e_y v_x) \sin \eta + \\ &+ (1 - \cos \eta)(\mathbf{e} \cdot \mathbf{v}) e_z), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\mathbf{v}^T = (v_x \ v_y \ v_z)$ ,  $\mathbf{e}^T = (e_x \ e_y \ e_z)$  — представление векторов через скалярные компоненты.

Моменты силы тяги относительно осей связанной системы координат могут быть вычислены с применением формул (3).

Полученные формулы (6) по форме отличаются от формул (4)—(5). Однако проведенное численное сравнение результатов их работы на нескольких исследуемых участках полета показало эквивалентность выполняемых по ним расчетов, что подтверждает справедливость принятых при выводе (4)—(5) допущений.

### Проверка модели двигателя по данным летных испытаний

После того как удалось получить модель для расчета проекций силы тяги и моментов, необходимо задуматься о способе проверки модели. К сожалению, эти величины в полете непосредственно не измеряются. Поэтому рассмотрим задачу, на которую точность их учета оказывает непосредственное влияние — идентификацию аэродинамических коэффициентов на закритических углах атаки. Если с применением модели проекций сил и моментов, создаваемых двигателями, удастся провести успешную идентификацию аэродинамических коэффициентов, то это будет аргументом в пользу правильности модели. В качестве критерия успешной идентификации примем соответствие оценок банку аэродинамических характеристик. Расхождение оценок будет указывать на ошибочность принятых допущений.

Идентификация коэффициентов бокового движения для одного из участков полета выполнялась по методике работы [7]. Поскольку на данном участке флапероны отклонялись почти синфазно с дифференциальным отклонением сопел (т. е. управляющие сигналы флаперонов и сопел двигателей в боковом канале были линейно зависимы), в стандартную методику было внесено изменение. Составляющие момента, создаваемого двигателем в боковом канале, вычислялись по предложенной выше модели и исключались из соответствующих уравнений. После этого оценки аэродинамических коэффициентов бокового канала вычислялись обычным образом. На рис. 7 (см. вторую сторону обложки) показаны в функции времени оценки приращения коэффициента момента рыскания, создаваемого флаперонами, полученные в результате идентификации и вычисленные по банку аэродинамических характеристик. Высокая точность совпадения оценок, полученных независимыми способами, является аргументом в пользу правильности предложенной модели сил и моментов двигателей.

### Заключение

В статье предложена методика проверки и уточнения данных о движении ЛА на закритических углах атаки, получаемых посредством летных испытаний.

Представлены алгоритмы вычисления проекций сил и моментов, создаваемых двигателями с отклоняемым вектором тяги.

Работоспособность представленных в статье методик и алгоритмов подтверждена примерами обработки полетных данных современных маневренных самолетов.

### Список литературы

1. Klein V., Morelli E. A. Aircraft system identification: Theory and Practice. USA, Reston: AIAA. 2006. 499 p.
2. Jategaonkar R. V. Flight vehicle system identification: A time domain methodology. USA, Reston: AIAA. 2006. 410 p.
3. Корсун О. Н., Поплавский Б. К. Технология идентификации аэродинамических коэффициентов летательных аппаратов по данным летных испытаний // Моделирование авиационных систем. ГосНИИАС, 2011. С. 444—451.
4. Корсун О. Н., Поплавский Б. К. Структура методологии идентификации математических моделей самолетов по результатам летных испытаний // Авиационные технологии XXI века. IX международный научно-технический симпозиум ASTEC'07. 2007.
5. Tischler M. B. System identification methods for aircraft flight control development and validation. Advances in aircraft flight control. 1996. P. 35—69.
6. Корсун О. Н., Николаев С. В. Методика идентификации аэродинамических коэффициентов продольного движения самолета в эксплуатационном диапазоне углов атаки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 4. С. 269—276.
7. Корсун О. Н., Николаев С. В. Идентификация аэродинамических коэффициентов самолетов в эксплуатационном диапазоне углов атаки // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 9(147). С. 3—10.
8. Nesaei S., Bahrami B. Data Processing Considerations in Flight Vehicle Identification // AEROTECH III, Kuala Lumpur, India, 2009.
9. Nesaei S., Raissi K. Data processing consideration and model validation in flight vehicle system identification // Signal Processing and Information Technology: First International Joint Conference, SPIT 2011, Amsterdam, The Netherlands, December 1—2, 2011.
10. Zhang J., Zhang P. Time series analysis methods and applications for flight data. Germany, Berlin: Springer-Verlag, 2017. 240 p.
11. Корсун О. Н., Лысюк О. П. Комплексная оценка погрешностей бортовых измерений и регистрации в целях обеспечения задач безопасности полетов // Проблемы безопасности полетов. 2007. № 2. С. 31—41.
12. Корсун О. Н., Николаев С. В., Поплавский Б. К. Алгоритмы проверки правильности полетных данных и оценивания нелинейностей при идентификации аэродинамических коэффициентов самолетов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 4. С. 270—278.
13. Корсун О. Н., Николаев С. В., Пушков С. Г. Алгоритм оценивания систематических погрешностей измерений воздушной скорости, углов атаки и скольжения в летных испытаниях // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2016. № 3. С. 118.
14. Корсун О. Н., Семенов А. В. Методика определения характеристик устойчивости и управляемости высотного дозвукового самолета М-55 "Геофизика" по результатам летного эксперимента и моделирования // Полет. 2006. № 2. С. 22—29.
15. Евдокименков В. Н., Ким Р. В., Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г. Использование нейросетевой модели управляющих действий летчика в интересах его индивидуально-адаптированной поддержки // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2015. № 4. С. 111.
16. Корсун О. Н., Семенов А. В. Оценка пилотажных характеристик самолетов по результатам летного эксперимента, идентификации и моделирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. № 7. С. 2—7.
17. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов / Под ред. Г. С. Бюшгенса. М.: Наука. Физматлит, 1998. 816 с.
18. ГОСТ 20058—80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. М.: Издательство стандартов, 1981. 54 с.
19. Голубев Ю. Ф. Основы теоретической механики. М.: Изд-во МГУ, 2000. 719 с.

# Analysis of the Aircraft Motion at the Overcritical Angles of Attack: Errors of On-Board Measurements and Simulation of the Deviated Thrust Vector

O. N. Korsun, marmotto@rambler.ru✉, A. V. Stulovsky,

State Research Institute of aviation systems, Moscow, 125167, Russian Federation,

A. V. Kanyshv,

State Flight Test Center named after V. P. Chkalov, Akhtubinsk, Russian Federation

Corresponding author: **Korsun Oleg N.**, D. Sc., Professor,  
State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, 125167, Russian Federation,  
e-mail: marmotto@rambler.ru

Received on June 29, 2017

Accepted on July 06, 2017

The article deals with the problems of the flight test data analysis concerning the flights at higher than critical angles of attack in order to improve the mathematical model of an aircraft's motion. The paper presents a technique for validation and correction of the on-board measurements for this type of motion. Regarding the use of the vector control during such maneuvers, the article considers the mathematical model of the forces and torques generated by the thrust vectoring. Examples of the data processing of the modern maneuverable aircraft's flight tests are presented to confirm the efficiency of the proposed models and methods. The validation of the on-board measurements, above all, the aerometric measurements, is based on the equations of the aircraft spatial motion. It is assumed that the correct values of the motion parameters must satisfy the system of the non-linear differential equations known from the flight dynamics. This approach has already proved its efficiency in the analysis of the flight data in the operational range of the angles of attack. The signals obtained through the simulation are used to correct the measurements in case of errors. The article presents examples of detection and correction of errors in the measurement channels for a true airspeed and angle of attack. This paper also proposes two versions of the model capable of calculation the projections of the forces and torques on the aircraft principal axes. The first version is derived from the evident geometrical considerations, the second one is based on Rodrigues' vector rotation formula known in the theoretical mechanics. A numerical comparison confirmed correctness of both obtained models. These models were also verified by processing of the flight tests data.

**Keywords:** flight tests, identification of the aerodynamic coefficients, verification of the on-board measurements, deviated thrust vector, overcritical angles of attack, supermaneuverability

**Acknowledgements:** The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project 17-08-00856-a.

For citation:

**Korsun O. N., Stulovsky A. V., Kanyshv A. V.** Analysis of the Aircraft Motion at Overcritical Angles of Attack: Errors of the On-Board Measurements and Simulation of the Deviated Thrust Vector, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 705–711.

DOI: 10.17587/mau.18.705-711

## References

1. Klein V., Morelli E. A. Aircraft system identification: Theory and Practice, USA, Reston, AIAA, 2006, 499 p.
2. Jategaonkar R. V. Flight vehicle system identification: A time domain methodology, USA, Reston, AIAA, 2006, 410 p.
3. Korsun O. N., Poplavskij B. K. Tehnologija identifikacii ajerodinamicheskikh koefitsientov letatel'nyh apparatov po dannym letnyh ispytaniy (Technology for identification of aerodynamic coefficients of the aircraft according to flight test), *Modelirovanie Aviacionnyh Sistem*, GosNIIAS, 2011, pp. 444–451 (in Russian).
4. Korsun O. N., Poplavskij B. K. Struktura metodologii identifikacii matematicheskikh modelej samoletov po rezul'tatam letnyh ispytaniy (Structure of methodology certification mathematical models of aircraft flight test results) // V sbornike: Aviacionnye tehnologii XXI veka. IX mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij simpozium ASTEC'07. 2007 (in Russian).
5. Tischler M. B. System identification methods for aircraft flight control development and validation, *Advances in Aircraft Flight Control*, 1996, pp. 35–69.
6. Korsun O. N., Nikolaev S. V. Metodika identifikacii ajerodinamicheskikh koefitsientov prodol'nogo dvizhenija samoleta v jekspluatacionnom diapazone uglov ataki (a Method of identification of aerodynamic coefficients of longitudinal motion of the aircraft in the operational range of angles of attack), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 269–276 (in Russian).
7. Korsun O. N., Nikolaev S. V. Identifikacija ajerodinamicheskikh koefitsientov samoleta v jekspluatacionnom diapazone uglov ataki (Aircraft Aerodynamic Coefficients Identification in the Angle of Attack Operational Range), *Vestnik Kompjuternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2016, no. 9, pp. 3–10 (in Russian).
8. Nesaei S., Bahrami B. Data Processing Considerations in Flight Vehicle Identification, *AEROTECH III*, Kuala Lumpur, India, 2009.
9. Nesaei S., Raissi S. Data processing consideration and model validation in flight vehicle system identification, *Signal Processing and Information Technology: First International Joint Conference, SPIT 2011*, Amsterdam, The Netherlands, December 1–2, 2011.
10. Zhang J., Zhang P. Time series analysis methods and applications for flight data, Germany, Berlin, Springer-Verlag, 2017, 240 p.
11. Korsun O. N., Lysjuk O. P. Kompleksnaja ocenka pogreshnostej bortovyh izmerenij i registracii v celjah obespechenija zadach bezopasnosti poletov (Comprehensive assessment of errors on board measurements and registration to ensure task safety), *Problemy Bezopasnosti Poletov*, 2007, no. 2, pp. 31–41 (in Russian).
12. Korsun O. N., Nikolaev S. V., Poplavskij B. K. Algoritmy proverki pravil'nosti poletnyh dannyh i ocenivaniya nelinejnostej pri identifikacii ajerodinamicheskikh koefitsientov samoletov (Algorithms for validation of flight data and the evaluation of nonlinearities of the aerodynamic coefficients of the aircraft), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 270–278 (in Russian).
13. Korsun O. N., Nikolaev S. V., Pushkov S. G. Algoritm ocenivaniya sistematicheskikh pogreshnostej izmerenij vozdušnoj skorosti, uglov ataki i skol'zhenija v letnyh ispytaniyah (An algorithm for estimating systematic measurement errors for air velocity, angle of attack, and sliding angle in flight testing), *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2016, 55 (3), pp. 446–457 (in Russian).
14. Korsun O. N., Semenov A. V. Metodika opredelenija harakteristik ustojchivosti i upravljaemosti vysotnogo dozvukovogo samoleta M-55 "Geofizika" po rezul'tatam letnogo jeksperimenta i modelirovanija (Method of determining the characteristics of stability and controllability of high-altitude subsonic aircraft M-55 Geofizika on the results of the flight experiment and simulation), *Polet*, 2006, no. 2, pp. 22–29 (in Russian).
15. Evdokimenko V. N., Kim R. V., Krasil'shchikov M. N., Sebrjakov G. G. Ispol'zovanie nejrosetevoj modeli upravljajushchih deistvij letchika v interesah ego individual'no-adaptirovannoj podderzhki (The use of the neural network model of pilot control actions for their individually-adapted support), *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2015, vol. 54, no. 4, pp. 609–620 (in Russian).
16. Korsun O. N., Semenov A. V. Ocenka pilotaznyh harakteristik samoletov po rezul'tatam letnogo jeksperimenta, identifikacii i modelirovanija (The Evaluation of flight characteristics of the aircraft according to the results of the flight test identification and simulation), *Vestnik Kompjuternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2007, no. 7, pp. 2–7 (in Russian).
17. Bjushgens G. S. ed. *Ajerodinamika, ustojchivost' i upravljaemost' sverhzvukovyh samoletov* (Aerodynamics, stability and controllability of supersonic aircraft), Moscow, Nauka, 1998, 816 p. (in Russian).
18. GOST 20058–80. *Dinamika letatel'nyh apparatov v atmosfere. Terminy, opredelenija i oboznachenija* (Dynamics of aircraft in the atmosphere. Terms, definitions and symbols), Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1981, 54 p. (in Russian).
19. Golubev Ju. F. *Osnovy teoreticheskoj mehaniki*. (Foundations of theoretical mechanics), Moscow, Publishing house of MGU, 2000, 719 p. (in Russian).

**А. В. Бобряков**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой, avbob@mail.ru,

**А. В. Зуев**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, мл. науч. сотр., zuev@dvo.ru,

**А. А. Кабанов**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, patronne@mail.ru,

**Б. Каталинич**<sup>4</sup>, проф., президент DAAAM International, branko.katalinic@tuwien.ac.at,

**В. Е. Пряничников**<sup>5</sup>, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., v.e.pr@yandex.ru,

**С. М. Стажков**<sup>6</sup>, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, stazhkov@mail.ru,

**В. Ф. Филаретов**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, filaretov@inbox.ru,

**В. Г. Хомченко**<sup>7</sup>, д-р техн. наук, проф., v\_khomchenko@mail.ru,

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", г. Москва,

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет и Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток,

<sup>3</sup> Севастопольский государственный университет, г. Севастополь,

<sup>4</sup> Венский технический университет и DAAAM International, г. Вена (Австрия),

<sup>5</sup> Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва,

<sup>6</sup> Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург,

<sup>7</sup> Омский государственный технический университет, г. Омск

## Особенности и возможности использования сетевых технологий в учебном процессе и в научных исследованиях при подготовке инженерных кадров различного уровня\*

*Описаны важнейшие принципы, а также особенности построения и эксплуатации межуниверситетской научно-образовательной сети, предназначенной для подготовки инженерных кадров различных уровней в области автоматизации производства, робототехники и других мехатронных систем.*

**Ключевые слова:** межуниверситетская научно-образовательная сеть, инженерное образование, автоматизация производства, робототехника, мехатроника

### Введение

За последние десятилетия российское инженерное образование прошло сложный путь различных преобразований и реформ, необходимость и целесообразность которых в обществе часто вызывала и вызывает полярные оценки. С одной стороны, переход к быстро развивающемуся постиндустриальному обществу, ориентированному на непрерывно обновляемое высокопроизводительное инновационное производство, требует новых подходов к подготовке современных инженеров и создания новых принципов обучения (усвоения материала) с использованием современных возможностей и технологий, а с другой — приходит осознание того, что многое полезное и важное из того, что было создано в области методики преподавания в высшей школе предшествующими поколениями российских ученых, в последние годы утрачивается или,

по крайней мере, принижается. Но технический и технологический прогресс, а также постоянно расширяющиеся человеческие возможности остановить невозможно, поэтому по-прежнему остро стоит проблема эффективного использования постоянно увеличивающегося потенциала общества для максимально возможного повышения уровня и эффективности высшего образования с учетом реально существующих ограничений временных и физиологических возможностей подрастающего поколения, которые в отличие от постоянно возрастающего объема знаний остаются практически неизменными.

Очевидно, что обновление специальных знаний и технологий постоянно ускоряется. Их становится все больше, а инженеров и специалистов, своевременно осваивающих и с требуемой компетентностью владеющих этими быстро устаревающими знаниями, объективно становится меньше. Особенно это относится к инженерным специальностям, связанным с освоением новой техники, которая, ускоренно обновляясь и совершенствуясь, существенно дорожает и становится малодоступной для

\* Работа поддержана грантами РФФИ (16-29-04195, 16-07-00300), а также грантом Президента РФ (МК-8536.2016.8).

многих даже продвинутых и крупных технических университетов, которые часто уже не успевают обновлять парк учебного и научного оборудования в условиях пока еще ограниченных финансовых возможностей государства. Поэтому эффективное использование имеющегося парка новейшего учебного оборудования для подготовки требуемого числа компетентных специалистов в передовых областях техники становится важнейшей задачей высшей школы.

Наметившийся переход к "конвейерной" подготовке специалистов, дефицит высокопрофессиональных, непрерывно обновляющих свои знания преподавателей и часто бездумное (к тому же возрастающее) использование в образовании "неконтактных" технологий уже сейчас приводят к тому, что связь "преподаватель—студент" постепенно ослабевает. Но ослабление непосредственного взаимодействия преподавателя и обучающегося как основы не только учебного, но и воспитательного процесса, приводит к тому, что существенно снижается важная роль и статус Учителя — Наставника. Однако в традиции российского высшего образования преподаватель всегда выполнял особую роль, осуществляя не только передачу знаний и воспитательные функции, но и формирование у молодого поколения необходимых профессиональных навыков и компетенций. Известные во всем мире выдающиеся российские научные и образовательные школы всегда возникали именно там, где Наставник был не только авторитетным и уникальным специалистом, но и незаурядной личностью. Поэтому, как бы ни реформировалось высшее образование, внедряя (притом не всегда правильно, удачно и эффективно) новые технологии обучения, ключевой фигурой по-настоящему качественного учебного процесса по-прежнему останется Наставник — преподаватель, осуществляющий, дозирующий и контролирующий передачу знаний, навыков и компетенций при постоянном и непосредственном контакте со студентами, но особенно с теми, которые имеют уникальные ярко выраженные способности к творческому развитию осваиваемой специальности.

Однако уже упомянутая проблема нехватки высококвалифицированных преподавателей-инженеров и особенно тех, которые способны параллельно с образовательным процессом одновременно активно и успешно выполнять теоретические и прикладные научные исследования и разработки на международном уровне, пока только усугубляется и обостряется. Во многом это обусловлено многолетним отсутствием в России достаточного финансирования научных исследований, а также отсутствием заинтересованности российской промышленности в результатах этих исследований и знаниях, полученных после завершения прикладных исследований.

Сейчас Россия хоть и с запозданием, но все же осуществляет значительное стимулирование научной деятельности, в том числе в рамках амбициоз-

ных программ 5-100, а также по 218 и 220 постановлениям Правительства РФ, по федеральным целевым программам, по грантам Российского научного фонда (РНФ), Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и др., но этого пока явно недостаточно для существенного повышения профессионального и научного уровня преподавательских кадров подавляющего большинства российских вузов и особенно тех, которые не отнесены к числу элитных и наиболее "продвинутых".

Еще одной важной проблемой в подготовке инженерных кадров для различных промышленных предприятий является не просто наполнение их конкретными знаниями по соответствующим специальностям, но и формирование у них реальных **компетенций** для активного решения производственных задач, связанных с освоением новой техники и с созданием производственных комплексов, в которых взаимоувязывается плохо программно и аппаратно стыкуемое мехатронное оборудование различных производителей. Как показывает опыт, этой компетенции и соответствующих навыков у инженерных кадров многих производственных предприятий совсем нет. Во многом именно поэтому наблюдается крайне медленное внедрение передовой техники и технологий в производство.

Ранее привязку, стыковку и доводку новой техники и технологий для решения конкретных производственных задач на предприятиях осуществляли специалисты отраслевых институтов. А сейчас после минимально информационного тестового запуска поставщиками конкретного оборудования специалисты заводов оказываются один на один с новым непонятным им оборудованием, которое им еще нужно не только самостоятельно состыковать и встроить в технологическую цепь реального производства, но и осуществить мелкие доработки, необходимые при стыковке. Очень часто при отсутствии требуемой компетенции и поддержки сторонних специалистов, которых в области мехатроники и робототехники в России совсем немного, процесс внедрения сопровождается длительным "параличом" участков, на которые поставляется новая техника, и формированием на предприятиях устойчивого отторжения нового для производства оборудования и новых технологий.

#### **Особенности и задачи сетевого обучения специалистов по автоматизации производства, робототехнике и мехатронике**

Во многом указанные выше проблемы уже сейчас можно решить посредством сетевой интеграции нескольких вузов с промышленными предприятиями и научными организациями. Но эффективность и успешность реализации сетевого образования зависит от многих его особенностей, включая широту и доступность, а также уровень непосредственного и реального контакта Наставника — преподавателя с обучающимися. Тем не менее, уже сейчас ясно, что сетевое образование, имея проч-

ную материально-техническую и научную основу, реально востребовано и будет непрерывно развиваться. Но каким будет это развитие, и как эффективно оно будет способствовать повышению уровня подготовки инженерных кадров даже при недостатке дорогостоящего учебно-научного лабораторного оборудования и высококвалифицированных преподавательских кадров (особенно в периферийных вузах или филиалах) сейчас зависит только от инициативных групп университетов, продвигающих эту форму университетского образования.

В данной работе описаны только некоторые важнейшие принципы, а также особенности построения и эксплуатации межуниверситетской научно-образовательной сети, предназначенной для подготовки инженерных кадров различных уровней в области автоматизации производства, робототехники и других мехатронных систем.

В сети реализуются четыре основные составляющие дистанционного обучения (образования):

- чтение ведущими профессорами лекционных курсов по специальным дисциплинам, для которых разработаны специальные учебно-методические материалы в виде электронных ресурсов (на нескольких языках), снабженных большим числом демонстрационных примеров и материалов (в виде роликов), иллюстрирующих реализацию изучаемого теоретического материала на практике;
- проведение лабораторных работ по этим дисциплинам с дистанционным использованием лабораторных установок, имеющихся у всех участников сети;
- дистанционное обучение проектному проектированию по материалам уже выполненных реальных проектов (в том числе и для нужд промышленных предприятий) по различным федеральным целевым программам, а также грантам РНФ и РФФИ;
- проведение различных производственных и эксплуатационных практик с использованием лабораторного и промышленного оборудования, имеющегося в распоряжении университетов — участников сети.

В одной статье с достаточной степенью детализации невозможно отразить все четыре составляющие сетевого образования, поэтому ниже будут изложены особенности дистанционной реализации только лабораторного практикума и проектного проектирования.

#### **Особенности реализации программно-аппаратных средств для дистанционной работы с лабораторным и промышленным оборудованием в сети**

Для реализации возможности дистанционной работы с любым мехатронным оборудованием различных моделей по сети необходимы специализированные программные и аппаратные средства, позволяющие обеспечить удаленный доступ по технологии VPN. На основе этой технологии под ру-

ководством В. Е. Пряничникова в Институте прикладной математики РАН было создано программное обеспечение, в котором предусмотрены средства для решения проблем синхронизации, временных задержек, разграничения прав доступа и построения mesh-сетей с подвижными ретрансляторами, недостаточно проработанные в системах типа ROS [1]. Это программное обеспечение реализует промежуточный уровень "middleware" между аппаратной частью и прикладным уровнем, позволяя объединять несколько мехатронных устройств с возможностью удаленного доступа к ним и обеспечивая (при необходимости) динамическое изменение конфигурации (автоконфигурацию) компонентов системы без остановки устройств.

Созданное программное обеспечение обладает свойствами кроссплатформенности (поддержка процессоров x86\ARM и операционных систем Windows\Linux\Android OS) для использования на различных бортовых вычислительных устройствах, имеет малый объем и обеспечивает возможность расширения списка драйверов для работы с новыми датчиками и приводами. При его создании был использован интерпретатор языка Python, обеспечивающий работу системы в реальном масштабе времени, и Тьюринг — полные протоколы для управления роботом вместо специализированных протоколов или графических интерфейсов типа GUI MS Robotic Studio и др.

Возможности языка Python позволяют реализовать функцию перепрограммирования системы непосредственно во время ее функционирования, что обеспечивает возможность использования супервизорного управления, когда вместо управляющих команд на приводы робота подаются минипрограммы их управления. Это исключает влияние сетевых задержек при формировании управления роботами, часто приводящих к возникновению ошибок или даже аварийных ситуаций.

Впервые апробация созданного программного обеспечения была проведена при групповом управлении мобильными колесными и гусеничными роботами серии АМУР (рис. 1) на территории Дальневосточного федерального университета [2]. В состав

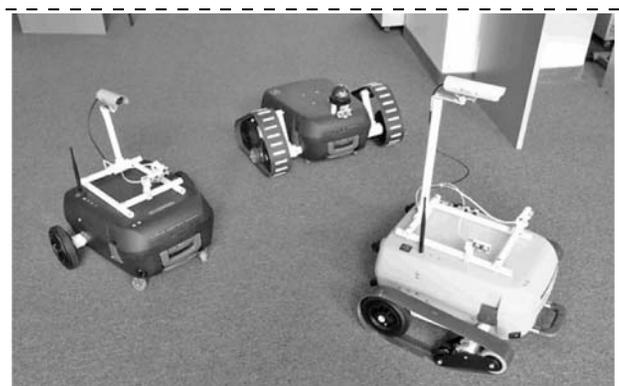


Рис. 1. Внешний вид различных мобильных роботов ДВФУ

каждого робота входил персональный бортовой компьютер, включаемый в локальную вычислительную сеть; система управления движением с усилителем сигналов управления и цифровыми дискретными входами/выходами; система измерения расстояний до обнаруживаемых предметов, построенная на основе ультразвуковых датчиков и микроконтроллера; видекамера для визуального контроля движений роботов и видеосервер, включенный в локальную вычислительную сеть.

Бортовым компьютером робота является ноутбук ASUS Eee PC 1011CX, работающий под управлением Xubuntu Linux, получающий информацию от датчиков, установленных на роботе, и формирующий команды управления всеми его электронными и мехатронными подсистемами. Запуск управляющего программного обеспечения, установленного на ноутбуке, осуществляется с помощью средств управления процессами `supervisord`, которые включают два компонента: драйвер, предоставляющий интерфейс для программного взаимодействия с контроллером через локальную вычислительную сеть, и специализированное программное обеспечение для сервисных функций.

Система управления роботами построена на основе микроконтроллера "Робокон" версии C2b, который передает информацию от одометрических датчиков робота на бортовой компьютер и формирует сигналы управления всеми приводами в соответствии с командами, получаемыми от компьютера. Синтез сигналов управления осуществляется с помощью двухканального электронного ключа, работающего в режиме ШИМ, параметры которого задает микроконтроллер. Для измерения дистанций используются два ультразвуковых датчика типа SRF05, их сигналы обрабатываются микроконтроллером Arduino UNO, который, в свою очередь, подключен к бортовому компьютеру. Этот микроконтроллер имеет более восьми цифровых входов-выходов, что позволяет расширять состав сенсоров и элементов управления.

Бортовая видеосистема роботов использует цветные аналоговые видекамеры, сигналы которых оцифровываются с помощью видеосервера модели Axis M7001, обеспечивая одновременное сжатие получаемого изображения по выбранному алгоритму с частотой кадровой развертки 50 Гц.

Описанные программно-аппаратные средства используются для дистанционного выполнения студентами лабораторного практикума по нескольким дисциплинам специальности, связанных с робототехникой, автоматизацией производства и мехатроникой. В условиях дефицита дорогого современного оборудования это расширяет круг дистанционных пользователей (студентов, магистрантов и аспирантов), выполняющих реальное проектирование в рамках конкретных научно-технических проектов по федеральным целевым программам, а также грантам РНФ и РФФИ. Только работа по конкретным техническим проектам с использованием реального

учебного и промышленного оборудования способна формировать у наиболее одаренных учащихся соответствующий уровень не только теоретических знаний и некоторых навыков практической работы, но и соответствующих компетенций по указанным специальностям, которые, несомненно, помогут им успешно решать задачи ускоренной, целенаправленной и качественной модернизации производственных процессов с использованием самых последних мировых достижений науки и техники.

### **Примеры лабораторного практикума и проектного проектирования студентов, дистанционно реализуемых с помощью сети**

**Групповое управление мобильными роботами.** В настоящее время важным направлением развития мобильных робототехнических систем является реализация их групповых действий в процессе выполнения сложных миссий. Групповое управление колесными и гусеничными роботами типа "Амур" с помощью сети при их перемещении различным строем (рис. 1, 2) выполняется студентами в лабораторных работах. Целью лабораторного практикума является получение теоретических знаний и практических навыков реализации сложных систем управления (СУ). При подготовке и выполнении лабораторных работ студенты изучают состав оборудования (рис. 3) мобильных роботов (МР), структуру их СУ, особенности формирования и обмена данными между всеми роботами, перемещающимися различным строем.

Изучаемая студентами система группового управления строится на основе стратегии "ведущий—ведомые". В группе назначается лидер. Только он имеет полную информацию о заданной траектории движения. Лидер сканирует окружающее пространство своими сенсорами, выявляя препятствия на пути следования группы, а остальные МР формируют свои траектории движения на основе информации о текущем положении лидера (рис. 4).

Студенты проверяют работоспособность и анализируют преимущества используемого подхода при организации группового управления в условиях ограниченной пропускной способности каналов



Рис. 2. Строй из пяти мобильных роботов

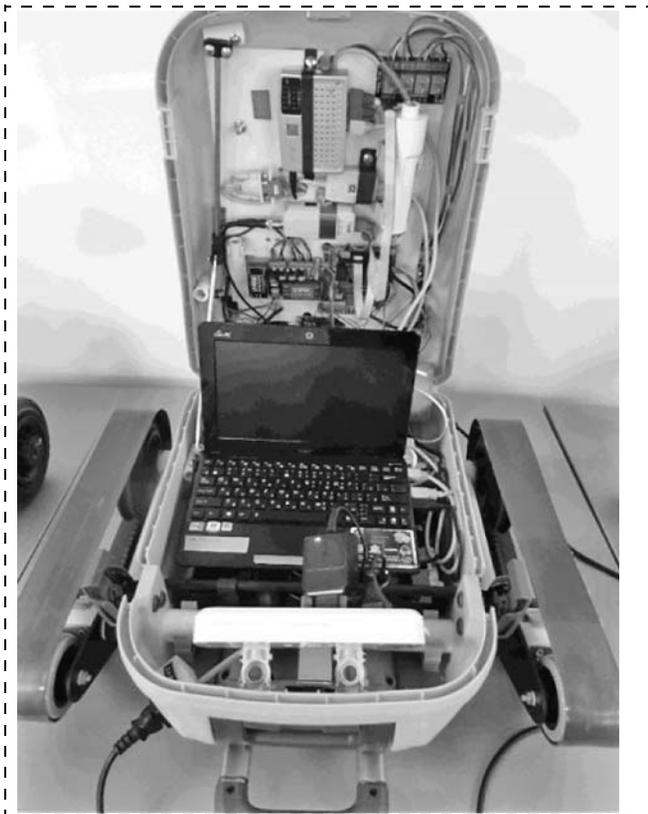


Рис. 3. Содержимое мобильных роботов

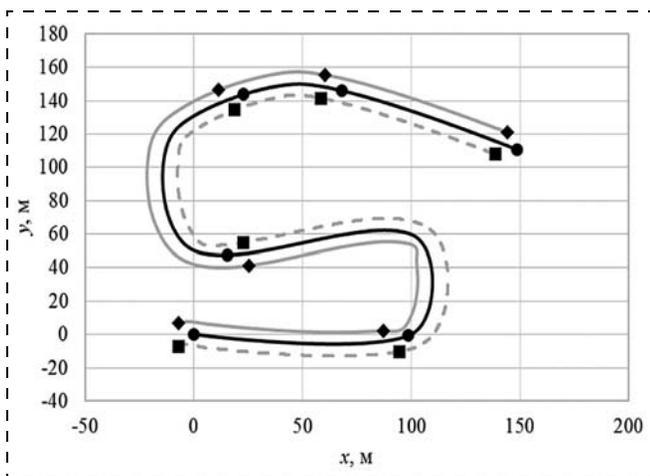


Рис. 4. Результирующая траектория движения трех роботов в составе группы, построенная информационно-управляющей системой

связи между всеми МР группы, изучают особенности передачи широковещательных сообщений от робота-лидера к роботам-ведомым (это исключает многократную передачу данных от лидера каждому ведомому или между ведомыми) и оценивают эффективность используемых систем по сравнению с известными. Затем студенты изучают и реализуют возможности системы по смене лидера и по изменению строя в процессе движения группы.

После проведения лабораторного практикума (в том числе и дистанционно с помощью сети) в ходе выполнения уже курсовых проектов по дисциплине "Автоматизированные информационно-уп-

равляющие системы", получив индивидуальные задания, студенты последовательно разрабатывают: архитектуру распределенной информационно-управляющей системы (ИУС), обеспечивающей взаимодействие с локальными ИУС отдельных МР группы; создают необходимые коммуникационные компоненты, позволяющие передавать данные между отдельными МР группы; строят, а затем и реализуют алгоритмы управления МР в зависимости от заданной миссии. Окончательной базовой задачей для выполняемого курсового проекта является демонстрация согласованного движения группы МР по заданной траектории в заданном строю (рис. 4). Эта демонстрация осуществляется и по сети, если курсовой проект выполняется студентами из различных университетов.

Курсовой проект по групповому управлению МР может быть усложнен, если он выполняется несколькими студентами. В этом случае лидеру дополнительно ставится задача обхода неожиданно появившихся заранее неизвестных препятствий. Задача обхода препятствий рассмотрена ниже.

**Управление автономными мобильным роботами в среде с препятствиями.** Расширение области применения МР требует увеличения их автономности при перемещении в нестационарном (изменяющемся) рабочем пространстве с заранее неизвестными препятствиями. Основным источником информации о наличии препятствий вблизи МР являются их бортовые датчики. Целью лабораторной работы и последующих курсовых проектов является получение студентами навыков создания ИУС МР, содержащих элементы искусственного интеллекта и обеспечивающих их безопасное перемещение в заранее неизвестном окружении (обход препятствий).

В лабораторной работе рассматриваются два подхода к решению указанной задачи. Первый — традиционный — основан на использовании метода потенциальных полей. Для реализации этого подхода студенты создают архитектуру ИУС, обеспечивающую возможность использования и настройки функций, описывающих потенциальное поле, а также исключают появление эффектов попадания в локальный минимум потенциального поля. Вторым подходом является формирование гладких траекторий движения МР и их подстройка на основе данных, поступающих от бортовых датчиков. При реализации этого подхода студенты разрабатывают модуль формирования программных сигналов перемещения МР, обеспечивающих их движение по траекториям, описываемым сплайнами Безье второго порядка. Движение МР по этим траекториям происходит с заданной скоростью (возможно переменной).

Пример движения МР Robotino в среде с препятствиями показан на рис. 5 (см. третью сторону обложки).

Перед выполнением работы студенты изучают теорию и публикации, подготовленные коллективом кафедры "Автоматизация и управление" ДВФУ

в процессе выполнения реальных научных проектов на русском и английском языках [4—6].

**Выполнение манипуляторами технологических операций с использованием систем технического зрения при наличии неизвестных деформаций в процессе закрепления заготовки перед механической обработкой.** При выполнении крупных научных проектов с промышленными предприятиями Приморского края (ПАО "Дальприбор" и ПАО ААК "ПРОГРЕСС") создана новая технология точной обработки гибких изделий произвольной геометрической формы с помощью многозвенных манипуляторов (ММ), оснащаемых системами технического зрения (СТЗ) [7—11]. Эта технология предполагает простую и быструю фиксацию изделия в универсальной оснастке с возможной произвольной деформацией ее геометрической формы; сканирование закрепленного изделия с помощью СТЗ; совмещение эталонной САД-модели изделия с его моделью, полученной после сканирования, для точного определения мест механической обработки; автоматическое построение траекторий движения рабочего инструмента ММ.

Целью этой лабораторной работы является освоение студентами созданной новой интеллектуальной роботизированной технологии точной и быстрой обработки сложных деталей. При проведении лабораторной работы студенты вначале произвольно деформируют и произвольно закрепляют выданную деталь. Затем осуществляют ее сканирование с помощью лазерного сканера Gocator 3280 А и получают компьютерную модель детали в виде облаков точек (рис. 6, см. третью сторону обложки). С помощью созданного программного обеспечения уплотняют облако, убирая просветы, и совмещают САД-модель с полученной трехмерной моделью отсканированной произвольно деформированной детали. После этого по специальному алгоритму определяются недеформированные и деформированные участки детали и обеспечивается перенос точек траекторий обработки детали с САД-модели на трехмерную модель деформированной детали. В заключение осуществляется (и наблюдается студентами) точное перемещение манипулятором Mitsubishi RV-2FB-D рабочего инструмента вдоль поверхности детали, имитирующее ее обработку (рис. 7, см. третью сторону обложки).

Более детально все расчеты с поэтапным моделированием всех указанных выше процессов выполняются студентами при курсовом проектировании в рамках дисциплины "Роботы и их системы управления". При групповом выполнении проекта с демонстрацией полученных результатов в задании на проектирование наиболее способным студентам добавляется раздел, касающийся задания максимально возможной скорости перемещения рабочего инструмента в пределах заданной динамической точности управления [12, 13].

**Управление роботом с избыточными степенями подвижности при обработке крупногабаритных из-**

**делий.** В процессе непрерывного выполнения с помощью ММ различных технологических операций часто возникают ситуации, когда некоторые их степени подвижности выходят на ограничения или появляется неоднозначность в решении обратной задачи кинематики, определяющем закон движения всех степеней подвижности многозвенника. В результате при работе ММ могут появляться неожиданные реверсы некоторых его приводов, часто приводящие к возникновению аварийных ситуаций или, в лучшем случае, к появлению брака.

Для устранения указанного явления могут использоваться избыточные линейные степени подвижности ММ, которые позволяют им не только обрабатывать протяженные объекты, но и выбирать такие расположения в пространстве, при которых неожиданные реверсы приводов не происходят. Схема лабораторной установки, реализующей использование дополнительных степеней подвижности ММ, показана на рис. 8. Эта система состоит из ММ KUKA и транспортера, имитирующего его дополнительную линейную степень свободы.

При выполнении лабораторной работы студенты составляют математическую модель всей системы, выбирают программную траекторию движения рабочего инструмента ММ относительно обрабатываемой детали и проводят математическое моделирование процесса обработки этой детали в целях определения участков траектории, на которых могут появляться непредсказуемые реверсы электроприводов. Деталь и программная траектория движения заранее задается такой, чтобы эти реверсы обязательно появлялись. Проведя специальный анализ, студенты определяют требуемое положение основания манипулятора относительно детали, при котором эти реверсы исключаются. Затем основание ММ перемещается в это заданное положение. После того как студенты при моделировании убеждаются в правильности выбранного нового положения, проводятся натурные испытания при выполнении ММ двух указанных движений на установке, показанной на рис. 8. При этом линейная степень подвижности ММ, имитирующая перемещение его основания относительно детали, обеспечивается транспортером.

В курсовых проектах студенты решают задачу выполнения рабочих операций с помощью ММ, когда места обработки изделий заранее неизвестны, а формируются с помощью СТЗ только в процессе выполнения конкретных технологических операций. При этом отсутствует возможность предварительного определения участков обработки, где могут происходить незапланированные реверсы. Поэтому синтезируемая студентами СУ содержит дополнительный блок, обеспечивающий автоматическое смещение основания ММ в случае обнаружения опасных участков непрерывно формируемой траектории обработки изделия. После математического моделирования рассмотренных ситуаций студенты также исследуют их с помощью натурной системы (рис. 8).



Рис. 8. Схема лабораторной установки, создающей ММ дополнительную степень подвижности

Все рассмотренные и другие лабораторные установки подключены к сети. Это позволяет выполнять лабораторный практикум дистанционно.

Но проведением лабораторного практикума и выполнением практических частей курсовых проектов возможности сети не исчерпываются. Наиболее способные студенты непосредственно участвуют в грантах федеральных целевых программ, РФФИ и РФФИ, реализуя новые системы, защищаемые патентами на изобретения и свидетельствами на программные продукты. Только это в конечном итоге способствует приобретению компетенций в области проектирования и внедрения на различных производствах интеллектуальных информационно-управляющих систем ММ с СТЗ.

Однако наиболее ценная особенность сети заключается в том, что с ее помощью реальные разработчики и проектировщики различных мехатронных систем могут изложить слушателям, находящимся в различных регионах мира, важнейшие особенности и этапы создания этих систем. Могут поделиться соображениями, методами и подходами, которые они использовали при решении неожиданно появляющихся проблем и задач. А учащиеся могут задать интересующие их вопросы и получить ответы от непосредственных исполнителей успешно реализованных проектов. Это бесценная форма получения слушателями необходимого опыта и компетенций, которые нельзя почерпнуть ни в каких опубликованных учебниках и учебных пособиях.

### Заключение

С учетом ограничения объема представляемого материала в данной статье даны только некоторые фрагменты построения и использования возможностей сетевого обучения. Несмотря на уже накопленный опыт успешной эксплуатации сети в нескольких российских и иностранных университетах,

а также в академических институтах и в промышленности, этот вид обучения еще только развивается. Безусловно, в будущем появятся новые сетевые формы передачи знаний и формирования у учащихся требуемых навыков и компетенций. Но главный успех сетевого образования будет обеспечен только в том случае, если, получив необходимый опыт, навыки и компетенции работы с реальным оборудованием, выпускники университетов или курсов переподготовки перестанут бояться новой, на первый взгляд, сложной техники и начнут интенсивное внедрение передовых технологий не только на различных отечественных предприятиях, но и в любых сферах человеческой деятельности.

### Список литературы

1. Пряничников В. Е., Биелич Т., Вицан Д., Каталнич Б., Кирсанов К. Б., Кувшинов С. В., Марзанов Ю. С., Подураев Ю. В., Хелемендик Р. В., Прысев Е. А., Углешик А., Харин К. В. Разработка образовательных технологий и сети ассоциированных лабораторий-роботариумов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. Т. 13. С. 7–25.
2. Pryanichnikov V. E., Filaretov V. F. Autonomous Mobile University Robot AMUR: Technology and Application to Extreme Robotics // Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 269–277.
3. Pryanichnikov V. E., Andreev V. P., Prysev E. A. Group control of mobile robots, based on the net-technologies // Proc. of the Int. Conference on Robotics for Security & Space (Planet & Earth rovers). St. Petersburg: Poliectnika service. 2010. P. 279–283.
4. Filaretov V., Yuxhimets D. The method of formation of AUV smooth trajectory in unknown environment // Proc. Of Int. Conf. OCEANS'2016. Shanghai, China. 2016. P. 1–8.
5. Filaretov V., Yuxhimets D., Novitsky A. The Mobile Robot Navigation Method Based on Onboard Sensors and Camera Data Fusion // Pros. of the Int. Conf. on Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing. Madeira, Portugal. 2016. P. 179–186.
6. Yuxhimets D. Neuron Net for Forming Optimal Smooth Trajectories Based on Bezier Splines // Applied Mechanics and Materials. 2017. Vol. 865. P. 442–449.
7. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Зуев А. В., Губанков А. С., Мурсалимов Э. Ш. Разработка метода совмещения трехмерных моделей обрабатываемых деталей с их CAD-моделями при наличии деформаций // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 3. С. 60–69.
8. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Зуев А. В., Губанков А. С. Метод автоматической обработки гибких изделий сложной пространственной формы на основе информации, получаемой от систем технического зрения и их CAD-моделей // Автоматизация в промышленности. 2016. № 12. С. 53–58.
9. Filaretov V., Zuev A., Yuxhimets D., Gubankov A., Mursali-mov E. Method of combination of three-dimensional models of details with their CAD-models at the presence of deformations // Proc. of 12th IEEE Conf. on Automation Science and Engineering. Fort Worth, Texas, USA. 2016. P. 257–261.
10. Filaretov V., Zuev A., Gubankov A., Yuxhimets D. A new approach to automatization of non-rigid parts machining at their deformation by using multilink manipulators with vision system // Proc. of the 2016 IEEE Intern. Conf. on Computer, Control, Informatics and its Applications. Jakarta, Indonesia. 2016. P. 227–232.
11. Filaretov V., Yuxhimets D., Zuev A., Gubankov A., Mursali-mov E. The Automatization Method of Processing of Flexible Parts without their Rigid Fixation // Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 4–13.
12. Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed // Proc. of International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications. Jakarta, Indonesia. 2016. P. 93–96.
13. Filaretov V. F., Gubankov A. S. Adaptive system forming extremely high speed of multilink manipulator gripper // Proc. of 23rd International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Zadar, Croatia. 2012. Vol. 1. P. 473–476.

# Specific Features and Opportunities of Employment of the Network Technologies in the Educational Process and Scientific Research for Training of Engineers of Various Levels

A. V. Bobryakov<sup>1</sup>, avbob@mail.ru, A. V. Zuev<sup>2</sup>, zuev@dvo.ru, A. A. Kabanov<sup>3</sup>, patronne@mail.ru, B. Katalinic<sup>4</sup>, branko.katalinic@tuwien.ac.at, V. E. Pryanichnikov<sup>5</sup>, v.e.pr@yandex.ru, S. M. Stazkov<sup>6</sup>, stazhkov@mail.ru, V. F. Filaretov<sup>2</sup>, filaretov@inbox.ru✉, V. G. Homchenko<sup>7</sup>, v\_khomchenko@mail.ru,

<sup>1</sup> Moscow Power Engineering Institute (University), Moscow, ..., Russian Federation,

<sup>2</sup> Far Eastern Federal University and Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, ..., Russian Federation,

<sup>3</sup> Sevastopol State University, Sevastopol, ..., Russian Federation,

<sup>4</sup> Vienna Technical University, Vienna, ..., Russian Federation,

<sup>5</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, ..., Russian Federation,

<sup>6</sup> Baltic State Technical University "Voenmeh" D. F. Ustinov, St. Petersburg, ..., Russian Federation,

<sup>7</sup> Omsk State Technical University, Omsk, ..., Russian Federation

Corresponding author: Filaretov Vladimir F., D. Sc., Far Eastern Federal University and Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, ..., Russian Federation, e-mail: filaretov@inbox.ru

Received on May 17, 2017

Accepted on May 30, 2017

*This paper presents the most important principles and features of construction and operation of the interuniversity scientific and educational network. This network is created for training of engineers in the field of automation, robotics and mechatronic systems. There were four main components of the distance education realized in the network. 1. Lectures in special disciplines were delivered by the leading professors, special educational materials in the form of electronic resources (in several languages) were used for the lectures. These electronic resources contained many demonstration examples illustrating implementation of the studied theoretical material in practice. 2. The laboratory classes in these disciplines were done with a remote use of the laboratory facilities available to all the network participants. 3. The remote education in the project design is based on the results already received during implementation of real scientific and commercial projects (including for industrial application). These projects were realized during the Russian federal target programs and grants (Russian Scientific Foundation and Russian Foundation for Basic Research). 4. Various production practices related to the laboratory and industrial equipment available in the Universities, which participated in the network, were provided. Also the paper contains certain features of the software and hardware implementation for the remote work with the laboratory and industrial equipment in the network. Several examples are presented of the laboratory work and project design done by the students remotely participating in the network.*

**Keywords:** interuniversity scientific and educational network, engineering education, production automation, robotics, mechatronics

**Acknowledgements:** The work was supported by the grants from the RFBR (16-29-04195, 16-07-00300), as well as a grant from the President of the Russian Federation (MK-8536.2016.8).

For citation:

Bobryakov A. V., Zuev A. V., Kabanov A. A., Katalinic B., Pryanichnikov V. E., Stazkov S. M., Filaretov V. F., Homchenko V. G. Specific Features and Opportunities of Employment of the Network Technologies in the Educational Process and Scientific Research for Training of Engineers of Various Levels, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 18, no. 10, pp. 712–720.

DOI: 10.17587/mau.18.712-720

## References

1. Pryanichnikov V. E., Bielich T., Vitsa D., Katalinic B., Kirsanov K. B., Jars S. V., Marzanov Y. S., Poduraev Yu. V., Helemendik R. V., Prysev E. A., Ugleshik A., Harin K. V. Development of educational technology and the associated laboratory-robotarium, *Information-measuring and operating systems*, 2015, vol. 13, pp. 7–25 (in Russian).
2. Pryanichnikov V. E., Filaretov V. F. Autonomous Mobile University Robot AMUR: Technology and Application to Extreme Robotics, *Procedia Engineering*. 2015, vol. 100, pp. 269–277.
3. Pryanichnikov V. E., Andreev V. P., Prysev E. A. Group control of mobile robots, based on the net-technologies, *Proc. of the Int. Conference on Robotics for Security & Space (Planet & Earth rovers)*. St. Peterburg.: Polielectnika service, 2010, pp. 279–283.

4. Filaretov V., Yukhimets D. The method of formation of AUV smooth trajectory in unknown environment, *Proc. Of Int. Conf. OCEANS'2016*. Shanghai, China. 2016, pp. 1–8.

5. Filaretov V., Yukhimets D., Novitsky A. The Mobile Robot Navigation Method Based on Onboard Sensors and Camera Data Fusion, *Pros. of the Int. Conf. on Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing*. Madeira, Portugal. 2016, pp. 179–186.

6. Yukhimets D. Neuron Net for Forming Optimal Smooth Trajectories Based on Bezier Splines, *Applied Mechanics and Materials*. 2017, vol. 865, pp. 442–449.

7. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Zuev A. V., Gubankov A. S., Mursalimov E. Sh. Development of the method of combining of three-dimensional models of machined parts with their CAD models in the presence of deformations, *Problems of Mechanical Engineering and Automation*, 2016, no. 3, pp. 60–69 (in Russian).

8. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Zuev A. V., Gubankov A. S. The method of automatic processing of flexible parts of complex spatial form on the basis of information obtained from vision systems and their CAD models, *Automation in industry*, 2016, no. 12, pp. 53–58 (in Russian).

9. Filaretov V., Zuev A., Yukhimets D., Gubankov A., Mursalimov E. Method of combination of three-dimensional models of details with their CAD-models at the presence of deformations, *Proc. of 12th IEEE Conf. on Automation Science and Engineering*. Fort Worth, Texas, USA. 2016, pp. 257–261.

10. Filaretov V., Zuev A., Gubankov A., Yukhimets D. A new approach to automatization of non-rigid parts machining at their deformation by using multilink manipulators with vision system, *Proc. of the 2016 IEEE Intern. Conf. on Computer, Control, Informatics and its Applications*, Jakarta, Indonesia. 2016, pp. 227–232.

11. Filaretov V., Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A., Mursali-mov E. The Automatization Method of Processing of Flexible Parts without their Rigid Fixation, *Procedia Engineering*. 2015, vol. 100, pp. 4—13.

12. Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed. *Proc. of International Conference on Com-*

*puter, Control, Informatics and Its Applications*, Jakarta, Indonesia. 2016, pp. 93—96.

13. Filaretov V. F., Gubankov A. S. Adaptive system forming extremely high speed of multilink manipulator gripper, *Proc. of 23rd International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, Zadar, Croatia. 2012, vol. 1, pp. 473—476.



## Поздравляем Юбиляра!

Признанному специалисту издательского дела,  
директору издательства "Новые технологии",  
члену редколлегии журнала  
"Мехатроника, автоматизация, управление"

**Борису Игоревичу  
АНТОНОВУ**

**исполнилось 80 лет**

Борис Игоревич, Ваш творческий путь от редактора издательства "Недра" до члена Главной редакции научно-технической литературы Госкомиздата СССР, главного редактора литературы по машиностроению и горному делу, главного редактора и первого заместителя директора издательства "Машиностроение", директора Издательства "Новые технологии" является ярким примером служения отечественной научно-технической литературе.

Благодаря профессионализму, неиссякаемой энергии, активной жизненной позиции и щедрости души Вы по праву снискали высокий авторитет среди коллег. Ваш огромный жизненный и профессиональный опыт является примером истинного, беззаветного служения Родине и преданности любимому делу. Вы являетесь организатором издательства "Новые технологии" — одного из ведущих отечественных издательств в области приоритетных направлений науки и технологий. Вы внесли неоценимый вклад в становление и развитие целого ряда научно-технических журналов, входящих в перечень ВАК РФ, включая журнал "Мехатроника, автоматизация, управление".

**Уважаемый Борис Игоревич!**  
**Редакционный совет, редакционная коллегия и редакция журнала поздравляют Вас**  
**и желают Вам крепкого здоровья, большого счастья,**  
**новых творческих успехов в Вашей многогранной деятельности!**

**Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

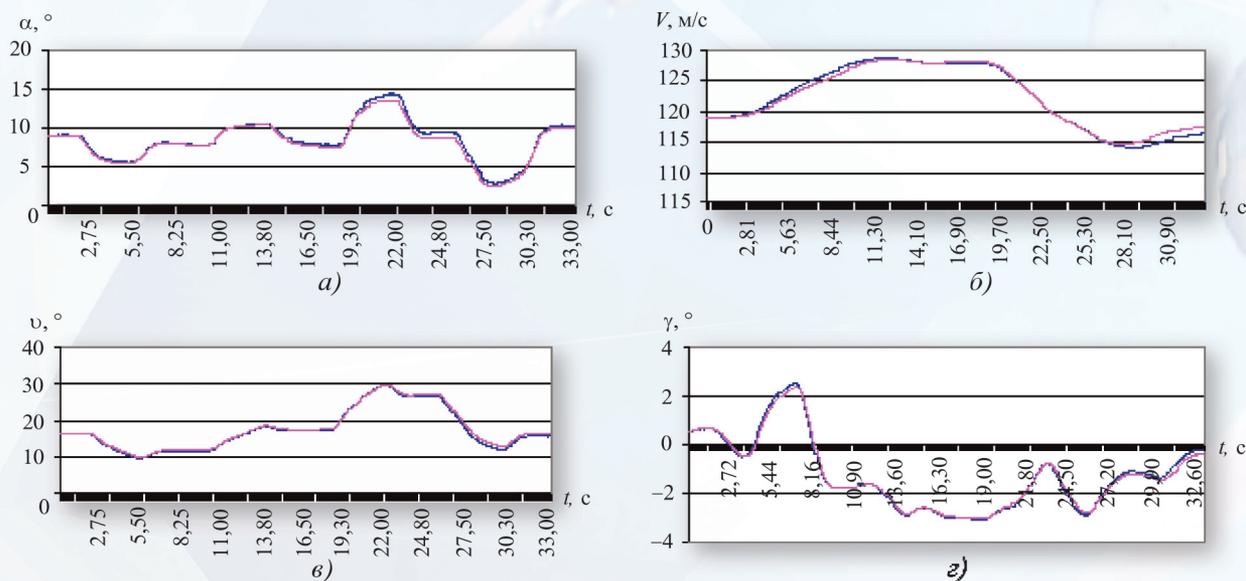
Сдано в набор 27.07.2017. Подписано в печать 17.09.2017. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1017. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,  
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

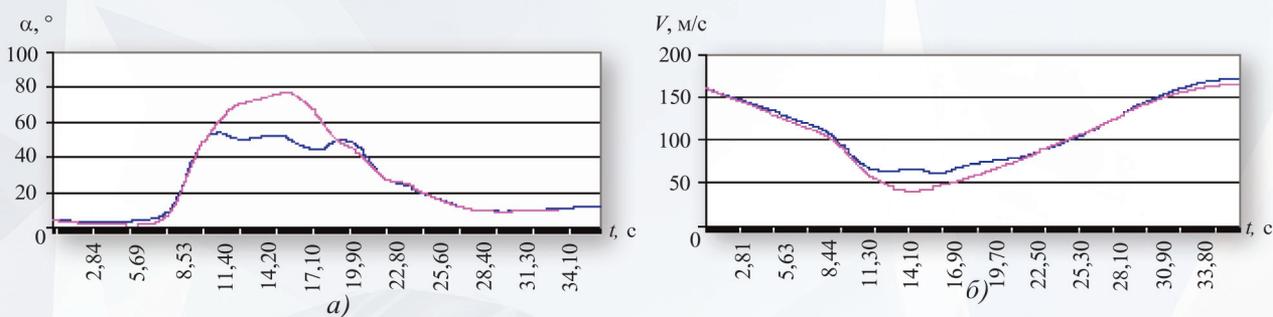
Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".  
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

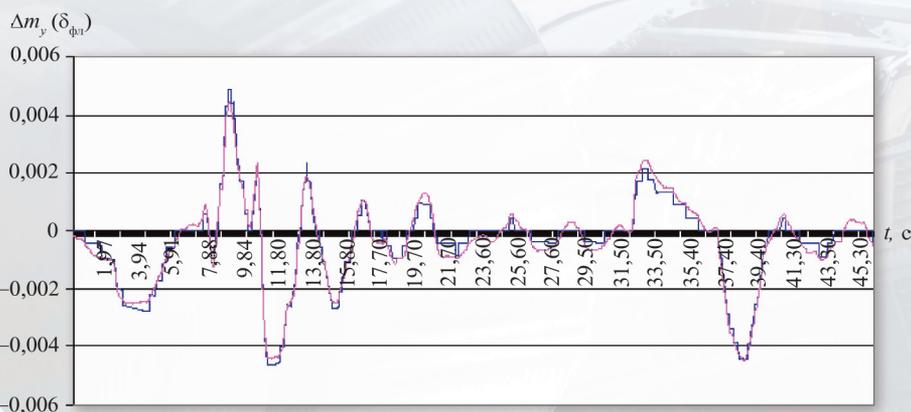
Рисунки к статье О. Н. Корсуна, А. В. Стуловского, А. В. Канышева  
**«АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ САМОЛЕТОВ НА ЗАКРИТИЧЕСКИХ УГЛАХ АТАКИ:  
 КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ БОРТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
 И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛОНЯЕМОГО ВЕКТОРА ТЯГИ»**



**Рис. 1.** Зависимость значений параметров движения, полученных из полетных данных (синяя линия) и при моделировании (фиолетовая линия), от времени:  
*a* – угол атаки; *b* – воздушная скорость; *v* – угол тангажа; *z* – угол крена

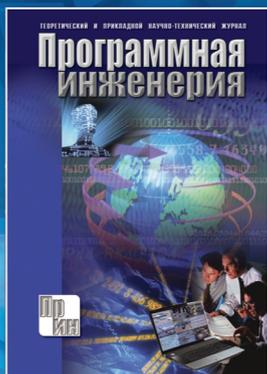


**Рис. 2.** Зависимость значений угла атаки (*a*) и скорости (*б*), полученных из полетных данных (синяя линия) и при моделировании (фиолетовая линия), от времени



**Рис. 7.** Зависимость значений приращения безразмерного коэффициента момента рыскания, создаваемого флаперонами, от времени, вычисленных по банку аэродинамических характеристик (синяя линия) и полученных путем идентификации (фиолетовая линия)

# Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ” выпускает научно-технические журналы



Теоретический и прикладной научно-технический журнал

## ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 22765; «Пресса России» – 39795

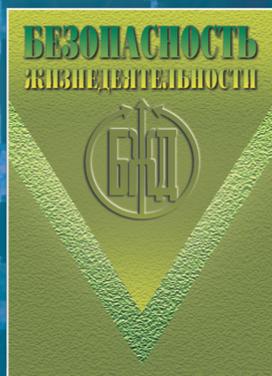


Ежемесячный теоретический и прикладной  
научно-технический журнал

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 72656; «Пресса России» – 94033

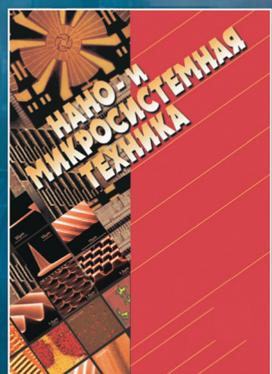


Научно-практический и учебно-методический журнал

## БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79963; «Пресса России» – 94032



Ежемесячный междисциплинарный  
теоретический и прикладной научно-технический журнал

## НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79493; «Пресса России» – 27849

Все журналы  
распространяются  
только по подписке.

Оформить подписку можно  
через подписные агентства  
либо непосредственно  
в редакции журналов.

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ”  
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10.

E-mail: antonov@novtex.ru