

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 6 (159)

ИЮНЬ

2014

Редакционный совет:

АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СИРОТКИН О. С., чл.-корр. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ШЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

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

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Кучеренко П. А., Соколов С. В. Алгоритмы нелинейной фильтрации в задаче структурной идентификации многоструктурных стохастических объектов 3

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

Осипов В. Ю. Развитие процессов обработки информации в ассоциативных интеллектуальных машинах 8

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Щербатов И. А., Проталинский И. О., Бородин В. А. Система интерпретирования голосовых команд для управления мобильным роботом 14

Горитов А. Н. Управление роботом-манипулятором в среде с неполной информацией . . . 19

Абрамов В. В., Иванюгин В. М., Петухов С. В. Система технического зрения для роботизации отделки (шпаклевки) железобетонных изделий 23

УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕСНЫМИ МАШИНАМИ

Павловский В. Е., Огольцов В. Н., Огольцов Н. С. Микрокомпьютерная система управления нижнего уровня для автомобиля с механической трансмиссией 29

УПРАВЛЕНИЕ СТАНКАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Чикуров Н. Г. Управление движением инструмента на пятикоординатных станках с ЧПУ . . 37

Кондратенко В. С., Третьякова О. Н., Наумов А. С., Шевченко Г. Ю., Зобов А. К. Аппаратно-программные средства управления лазерным технологическим оборудованием для резки приборных пластин 43

Лебедев В. А., Гулый М. В. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки 47

Журнал в журнале**"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА
В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"**

Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 1. . . 53

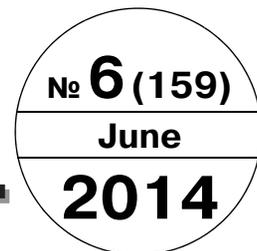
Шибанов Г. П. Оптимизация процесса контроля бортовых комплексов оборудования летательных аппаратов 56

Александровская Л. Н., Борисов В. Г., Мазур В. Н., Хлгатын С. В., Ардалионова А. Е. Параметрические методы оценки соответствия требований к безопасности автоматической посадки самолетов нормам летной годности. 62

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

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Editorial Council:

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

Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

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

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V.

CONTENTS

METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

Kucherenko P. A., Sokolov S. V. Nonlinear Filtering Algorithms Applied to the Solution of the Stochastic Multistructural Plant's Structure Identification Problem 3

INTELLIGENT TECHNOLOGY IN THE TASKS OF INFORMATION PROCESSING

Osipov V. Yu. Development of Information Processing in Associative Intelligent Machines. 8

ROROTIC SYSTEMS

Shcherbatov I. A., Protalinskii I. O., Borodin V. A. The System of Interpreting of Voice Commands for Control a Mobile Robot 14

Goritov A. N. The Control of a Robot Manipulator in an Environment with Incomplete Information 19

Abramov V. V., Ivanyugin V. M., Petukhov S. V. Computer Vision System for Robotics Finishes (Shpackling) Ferroconcrete Items 23

CONTROL OF WHEEL MACHINES

Pavlovsky V. E., Ogoltsov V. N., Ogoltsov N. S. Microcomputer Low Level Control System for the Car with Mechanical Transmission. 29

CONTROL OF MACHINES AND TECHNOLOGICAL MACHINERY

Tchikurov N. G. Tool Traffic Control on 5 Coordinate Machine Tools with CNC 37

Kondratenko V. S., Tretiyakova O. N., Naumov A. S., Shevchenko G. Yu., Zobov A. K. Hardware and Software Tools for Controlling Laser-Processing Equipment for Cutting Instrument Wafers 43

Lebedev V. A., Guly M. V. The High-Speed Valve Electric Drive for the Equipment of the Mechanized Arc Welding 47

Journal within journal

"CONTROL AND INFORMATICS IN THE AEROSPACE AND MARINE SYSTEMS"

Filaretov V. F., Konoplin A. Y. System of Automatic Stabilization of Underwater Vehicle in Stationkeeping Regime with Working Multilink Manipulator. Part 1 53

Shibanov G. P. Checkout Onboard Complex of Equipment of Flying Device Optimization . 56

Aleksandrovskaya L. N., Borisov V. G., Mazur V. N., Khlgatyan S. V., Ardalionova A. E. Parametric Methods for Assessing Compliance with the Safety Requirements of Automatic Landing Aircraft Airworthiness 62

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

УДК 621.396

П. А. Кучеренко, канд. техн. наук, доц., pavelpost83@mail.ru, С. В. Соколов, д-р техн. наук, проф.,
Ростовский государственный университет путей сообщения

Алгоритмы нелинейной фильтрации в задаче структурной идентификации многоструктурных стохастических объектов¹

Показана актуальность исследования методов структурной идентификации нелинейных дискретных стохастических объектов. Предложена общая структура алгоритма идентификации с использованием формирователей оценок вектора переменных состояния многоструктурного объекта на основе алгоритмов нелинейной фильтрации. Синтезирован алгоритм структурной идентификации с использованием критерия минимума автокорреляционной функции невязки. Рассмотрен численный пример структурной идентификации нелинейного стохастического объекта, иллюстрирующий эффективность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, структурная идентификация, стохастический дискретный многоструктурный объект, нелинейный фильтр Калмана

P. A. Kucherenko, S. V. Sokolov

Nonlinear Filtering Algorithms Applied to the Solution of the Stochastic Multistructural Plant's Structure Identification Problem

The relevance of the methods of the structure identification of the discrete nonlinear stochastic objects is performed in the paper. The general scheme of the structure identification procedure based on the nonlinear filtering algorithms is offered. The synthesis of the identification algorithm using residual's autocorrelation minimum criterion is considered. The model example which demonstrates an efficiency of the offered approach is performed.

Keywords: digital signal processing, structure identification, stochastic discrete multistructural object, extended Kalman filter

Введение

Разработка эффективных систем структурного распознавания объектов и сигналов различной физической природы, в общем случае стохастических, является в настоящее время одной из центральных задач для целого ряда научно-технических направлений, таких как телекоммуникация с кодовым разделением абонентов, спутниковая радионавигация, радиоастрономия, сейсмология и т. д. [1–4]. В существующих на сегодняшний день работах предложены различные варианты ее решения, в основном, для непрерывных систем [4–7], в то время как в исследованиях, ориентированных на дискретные многоструктурные объекты, основное внимание уделяется лишь разработке алгоритмов оценивания элементов вектора переменных состояния многоструктурного объекта [8–10] и практически без внимания остается проблема его эффективной структурной идентификации. Кроме того, отметим, что появляющиеся в последнее время решения с использованием дискретной калмановской фильтрации ограничиваются, как правило, рассмотрением линейных моделей объектов и их измерителей [11], что резко сужает области применения

подобных подходов для реальных процессов и систем, обладающих существенно нелинейной динамикой. Таким образом, проведение исследований, направленных на синтез методов и алгоритмов, позволяющих решить задачу идентификации структур дискретных нелинейных объектов на основе теории стохастической нелинейной фильтрации, представляется весьма актуальным как с практической, так и с теоретической точек зрения.

1. Постановка задачи структурной идентификации

Пусть дискретный объект со случайной сменой структур задан в самом общем случае нелинейным разностным уравнением

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}^{(l)}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{n}_k^{(l)}), \quad l = \overline{1, L}, \quad (1)$$

где k — текущий такт времени; l — номер структуры объекта; L — общее число возможных структур объекта; \mathbf{x}_k — N -мерный вектор состояния объекта в k -й момент времени; $\mathbf{n}_k^{(l)}$ — N -мерный вектор шума объекта для структуры l ; $\mathbf{f}^{(l)}(\dots)$ — соответствующая структуре l известная нелинейная вектор-функция.

Вектор наблюдения для k -го момента времени \mathbf{z}_k размерности M описывается следующим уравнением наблюдения (в общем случае также нелинейным):

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k), \quad (2)$$

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 12-07-00012-а, № 13-07-00226 а, № 13-07-13109 офи_м_РЖД).

где $\mathbf{h}(\dots)$ — известная нелинейная вектор-функция наблюдения; \mathbf{w}_k — M -мерный вектор шума наблюдения.

Номер структуры объекта l изменяется в произвольные моменты времени жизненного цикла объекта (1), т. е. процесс смены структуры предполагается дискретным во времени случайным процессом с полностью неизвестными вероятностными характеристиками.

Таким образом, в рассматриваемом общем нелинейном стохастическом случае задача идентификации структуры многоструктурного объекта (1) может быть сформулирована как задача максимально точного и оперативного определения текущего номера структуры объекта l на основе наблюдаемых измерителем (2) дискретных отсчетов сигнала наблюдения.

2. Общая структура алгоритма идентификации

С учетом отмеченного выше роста числа разработок эффективных алгоритмов формирования оценок состояния стохастических объектов, а также очевидной способности этих оценок адекватно отражать закономерности функционирования соответствующего динамического объекта, представляется целесообразным построение алгоритма структурной идентификации на основе использования набора (банка) формирователей оценок (ФО), соответствующих различным структурам ("настроенных" на каждую из L возможных структур), с последующей интерпретацией выходных сигналов в пользу той или иной структуры. Очевидно, что только одна из L оценок будет соответствовать измеренному сигналу и, следовательно, только для нее будут выполнены условия оптимума некоторого критерия оптимальности J , выбираемого исходя из физического смысла решаемой задачи и особенностей исследуемых объектов. (Более детально использование одного из возможных вариантов критерия J будет рассмотрено ниже при дальнейшей конкретизации предлагаемого подхода к решению задачи структурной идентификации.)

На рис. 1 приведен общий вид структурной схемы предлагаемого алгоритма структурной идентификации со следующими условными обозначениями:

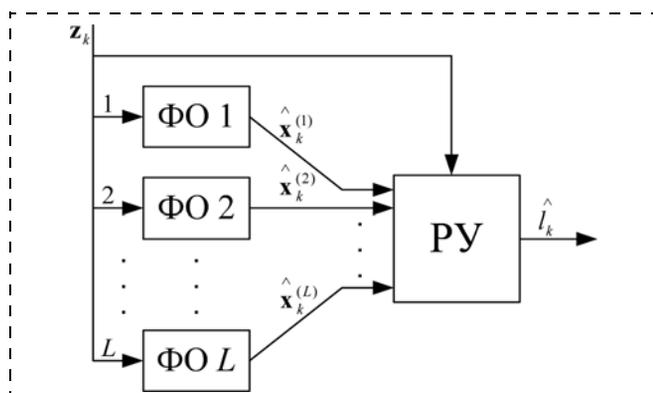


Рис. 1

ФО $l, l = \overline{1, L}$, — формирователь вектора оценок текущего состояния многоструктурного объекта $\hat{\mathbf{x}}_k^{(l)}$, соответствующего l -й структуре; РУ — решающее устройство, формирующее на своем выходе текущее значение оценки номера структуры объекта \hat{l}_k .

В качестве возможных методов формирования оценок $\hat{\mathbf{x}}_k^{(l)}, l = \overline{1, L}$, на выходах ФО могут быть использованы известные алгоритмы нелинейной фильтрации (нелинейный фильтр Калмана, фильтры на основе метода статистических испытаний [9, 10], алгоритмы оценивания по критерию максимума апостериорной плотности вероятности [12] и др.), выбор которых, в конечном счете, определяется характерными особенностями исследуемого стохастического объекта и его наблюдателя.

Здесь также следует отметить, что для повышения точности процедуры идентификации определение текущих оценок номера структуры объекта в РУ целесообразно проводить не на основе единичного ансамбля сформированных на очередном шаге алгоритма оценок $\hat{\mathbf{x}}_k^{(l)}, l = \overline{1, L}$, а с использованием некоторого интегрального показателя — сразу для некоторой совокупности ансамблей оценок, определенных на выбранном временном интервале работы алгоритма, например, используя для этого свойства взаимной корреляции оценок переменных состояния и наблюдаемого сигнала или автокорреляционные особенности вычисляемых для различных структур значений невязок и т. д. (Использование последних подробно рассмотрено ниже при синтезе конкретного варианта алгоритма идентификации.)

Таким образом, условие оптимизации критерия идентификации структуры объекта на основе сформированных на выходах различных ФО ансамблей оценок его переменных состояния можно записать в виде

$$\min_l J = \min_l Q^{(l)}(\hat{\mathbf{x}}_{k-N_S+1}^{(l)}, \hat{\mathbf{x}}_{k-N_S+2}^{(l)}, \dots, \hat{\mathbf{x}}_k^{(l)}),$$

где k — текущий временной шаг работы алгоритма; $Q^{(l)}$ — выбранная критериальная функция, в общем случае определяемая для каждой из возможных структур объекта; N_S — размер выбранного интервала работы алгоритма идентификации.

Рассмотрим далее один из вариантов алгоритма структурной идентификации, синтезированного в соответствии с предложенной схемой (рис. 1) и позволяющего обеспечить устойчивое высокоточное, и в то же время оперативное, решение задачи идентификации структур нелинейного стохастического объекта.

3. Синтез алгоритма структурной идентификации на основе критерия минимума автокорреляционной функции невязки

Формирование алгоритма структурной идентификации рассмотрим для характерного для практики частного случая многоструктурного объекта (1) и его наблюдателя (2), предположив возмущающие воздействия $\mathbf{n}_k^{(l)}, l = \overline{1, L}$, и \mathbf{w}_k векторными центрированными гауссовскими случайными последова-

тельностью с независимыми элементами и известными ковариационными матрицами $\mathbf{Q}^{(l)}$, $l = \overline{1, L}$, и \mathbf{R} , соответственно, а также их аддитивное вхождение в уравнения (1) и (2).

В этом случае уравнения объекта и его наблюдателя примут следующий вид:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}^{(l)}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{n}_k^{(l)}, l = \overline{1, L}; \quad (3)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k. \quad (4)$$

В качестве ФО состояния идентифицируемого объекта используем далее наиболее широко применяемый в настоящее время алгоритм нелинейной фильтрации — алгоритм нелинейного дискретного фильтра Калмана (НФК), обладающий достаточной вычислительной эффективностью и удобной программной реализацией.

Уравнения НФК, определяющие алгоритм формирования оценок переменных состояния для различных структур рассматриваемого объекта (3) и его наблюдателя (4), можно записать в следующем виде [13]:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^{(l)} = \mathbf{f}^{(l)}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{(l)}) + \mathbf{K}_k^{(l)}(\mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{(l)})), l = \overline{1, L}; \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_k^{(l)} = \mathbf{P}_{k|k-1}^{(l)} \mathbf{H}_k^{(l)\top} \mathbf{S}_k^{(l)-1};$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1}^{(l)} = \mathbf{F}_{k-1}^{(l)} \mathbf{P}_{k-1}^{(l)} \mathbf{F}_{k-1}^{(l)\top} + \mathbf{Q}^{(l)};$$

$$\mathbf{S}_k^{(l)} = \mathbf{H}_k^{(l)} \mathbf{P}_{k|k-1}^{(l)} \mathbf{H}_k^{(l)\top} + \mathbf{R};$$

$$\mathbf{P}_k^{(l)} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^{(l)} \mathbf{H}_k^{(l)}) \mathbf{P}_{k|k-1}^{(l)};$$

$$\mathbf{F}_{k-1}^{(l)} = \left. \frac{d\mathbf{f}^{(l)}}{d\mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{(l)}}, \quad \mathbf{H}_k^{(l)} = \left. \frac{d\mathbf{h}}{d\mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{(l)}},$$

где $\mathbf{F}_{k-1}^{(l)}$, $\mathbf{H}_k^{(l)}$ — матрицы (якобианы), полученные в результате линеаризации функций объекта и наблюдателя в окрестностях вектора оценок $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{(l)}$, определенного на $(k-1)$ -м шаге алгоритма для структуры с номером l ; \mathbf{I} — единичная матрица размера $N \times N$.

Реализация вышеописанного рекуррентного алгоритма предполагает задание начальных значений для векторов переменных состояния объекта $\hat{\mathbf{x}}_1^{(l)}$ и матриц апостериорных дисперсий $\mathbf{P}_1^{(l)}$, выбор которых осуществляется с учетом конкретных особенностей исследуемого объекта и его наблюдателя.

С учетом сделанных предположений о вероятностных характеристиках помех и выбранного алгоритма формирования оценок конкретизируем процедуру принятия решения в РУ относительно текущих значений номера структуры объекта, представив ее в виде следующих этапов.

На *этапе 1* проводится вычисление значений текущих невязок для каждой из структур по формуле

$$\mathbf{e}_k^{(l)} = \mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^{(l)}), l = \overline{1, L}.$$

На *этапе 2* для имеющейся текущей выборки невязок размера N_S (также для каждой из возможных структур) вычисляются значения их автокорреляционных функций (АКФ) для различных относи-

тельных временных сдвигов $t = 1, \dots, N_t$ в соответствии с выражением

$$C_k^{(l)}(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{1}{N_S} \sum_{i=k-N_S+1}^k \mathbf{e}_i^{(l)}(j) \mathbf{e}_{i-t}^{(l)}(j), \quad l = \overline{1, L}, t = 1, \dots, N_t, \quad (6)$$

где $\mathbf{e}_i^{(l)}(j)$ — обозначение j -го элемента вектора невязки $\mathbf{e}_i^{(l)}$, вычисленного на i -м шаге для структур с номером l .

На основе полученных значений АКФ невязки в рамках этого же этапа осуществляется расчет текущих значений критериальных функций $Q_k^{(l)}$, $l = \overline{1, L}$, по формуле

$$Q_k^{(l)} = \sum_{t=1}^{N_t} C_k^{(l)2}(t), l = \overline{1, L}. \quad (7)$$

На *этапе 3* в качестве текущей оптимальной (в данном случае субоптимальной) оценки номера структуры объекта \hat{l}_k выбирается номер структуры, соответствующий минимальному из рассчитанных значений $Q_k^{(l)}$, $l = \overline{1, L}$, т. е.

$$\hat{l}_k = \arg \min_l Q_k^{(l)}. \quad (8)$$

Заметим здесь, что выбор данного критерия обусловлен известным свойством значений невязок, получаемых на основе оптимальных оценок калмановской фильтрации, а именно, эквивалентностью их статистических характеристик аналогичным характеристикам белого шума (БШ) (в данном случае учитывалось свойство БШ, заключающееся в равенстве нулю значений его АКФ для любых относительных временных сдвигов). Иными словами, в качестве оптимальной оценки номера структуры принимается ее значение, соответствующее минимальному суммарному квадратичному отклонению значений АКФ невязки для различных временных сдвигов относительно нуля.

В целях сокращения вычислительных затрат после определения оптимального номера структуры $\hat{l}_k = m$ на текущем шаге дальнейшие вычисления этапов 1 и 2 алгоритма выполняются только для найденной m -й структуры. Возобновление расчета для всей совокупности возможных структур осуществляется лишь при превышении значения критериальной функции $Q_k^{(m)}$ некоторой заранее заданной пороговой величины ΔQ .

На рис. 2 представлена детализированная структурная схема предлагаемого алгоритма идентификации (особенности учета порогового значения ΔQ для сохранения простоты и наглядности схемы на рисунке не показаны), где использованы следующие условные обозначения:

НФК l , $l = \overline{1, L}$, — нелинейный фильтр Калмана, соответствующий l -й структуре объекта; ВН — блок вычисления невязок; ВАКФ — блок вычисления АКФ невязки в соответствии с выражением (6); ООС — блок определения (в соответствии с выражением (8)) текущей оценки номера структуры \hat{l}_k ,

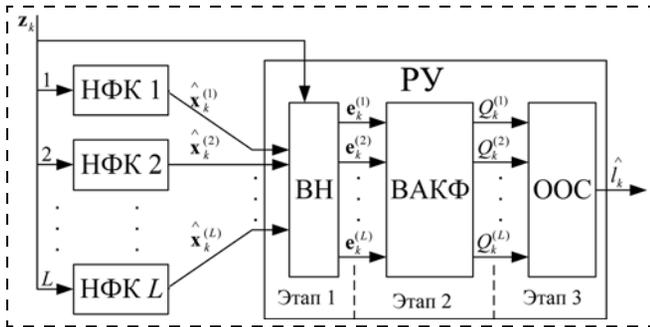


Рис. 2

удовлетворяющей выбранному критерию оптимальности.

Эффективность предложенного метода структурной идентификации проиллюстрируем следующим примером.

4. Пример

Пусть стохастический нелинейный объект со случайной сменой структуры задан следующей системой векторных уравнений:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k^{(1)} = \mathbf{f}^{(1)}(\mathbf{x}_{k-1}^{(1)}) + \mathbf{n}_k^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{k-1}^{(1)}(1) \\ x_{k-1}^{(1)}(2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_k^{(1)} \\ 0 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{x}_k^{(2)} = \mathbf{f}^{(2)}(\mathbf{x}_{k-1}^{(2)}) + \mathbf{n}_k^{(2)} = \\ = \begin{bmatrix} 0,45 \sin(0,1kx_{k-1}^{(2)}(2)) \\ x_{k-1}^{(2)}(2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_k^{(2)} \\ 0 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (9)$$

где $\mathbf{n}_k^{(1)}$, $\mathbf{n}_k^{(2)}$ — центрированные независимые гауссовские последовательности с дисперсиями $D_n^{(1)} = D_n^{(2)} = 0,03$ (при этом входящие в (5) ковариационные матрицы шумов объекта для 1-й и 2-й структур определяются как $\mathbf{Q}^{(1)} = \mathbf{Q}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0,03 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$).

Моменты смены структуры объекта для рассматриваемого примера выбирались в соответствии с представленной на рис. 3 зависимостью номера структуры l_k от шага работы алгоритма идентификации k .

Как видно из приведенной зависимости, в качестве начальной структуры многоструктурного объекта (9) была выбрана структура с номером $l_1 = 2$. При этом начальный вектор состояния объекта выбирался равным $\mathbf{x}_1^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$.

Наблюдение переменных состояния исследуемого объекта осуществлялось скалярным измерителем, описываемым уравнением

$$z_k = [1 \ 0] \cdot \mathbf{x}_k + w_k,$$

где w_k — центрированная независимая гауссовская последовательность с дисперсией $D_w = 0,05$ (входящая в (5) ковариационная матрица шума наблюдения \mathbf{R} состоит из одного элемента D_w).

Значения матриц $\mathbf{F}_k^{(l)}$ и $\mathbf{H}_k^{(l)}$, входящих в уравнения НФК (5), в рассматриваемом случае примут вид

$$\mathbf{F}_k^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_k^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0,45k \cos(0,1k\hat{x}_{k-1}^{(2)}(2)) & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{H}_k^{(1)} = \mathbf{H}_k^{(2)} = [1 \ 0].$$

Для всех использованных в примере рекуррентных фильтров задавали следующие начальные условия функционирования:

$$\hat{\mathbf{x}}_1^{(1)} = \hat{\mathbf{x}}_1^{(2)} = \begin{bmatrix} 0,7 \\ 0,8 \end{bmatrix}, \mathbf{P}_1^{(1)} = \mathbf{P}_1^{(2)} = \begin{bmatrix} 0,05 & 0 \\ 0 & 0,05 \end{bmatrix}.$$

Размер выборки N_e и число анализируемых относительных временных сдвигов N_t выбирали равными $N_e = 40$, $N_t = 40$.

На рис. 4 представлены зависимости значений первых элементов векторов оценок $\hat{x}_k^{(1)}$ и $\hat{x}_k^{(2)}$, сформированных на выходах НФК 1 и НФК 2 (см. рис. 2), от номера шага работы алгоритма (при $400 \leq k \leq 1100$). Здесь следует отметить, что вид представленных зависимостей, охватывающих только два первых изменения структуры объекта, не претерпевает каких-либо качественных изменений на

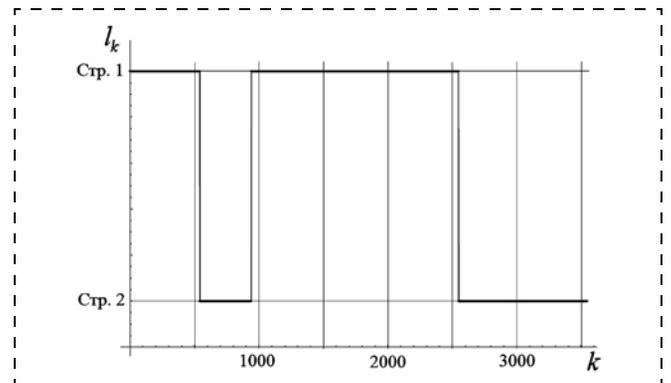


Рис. 3

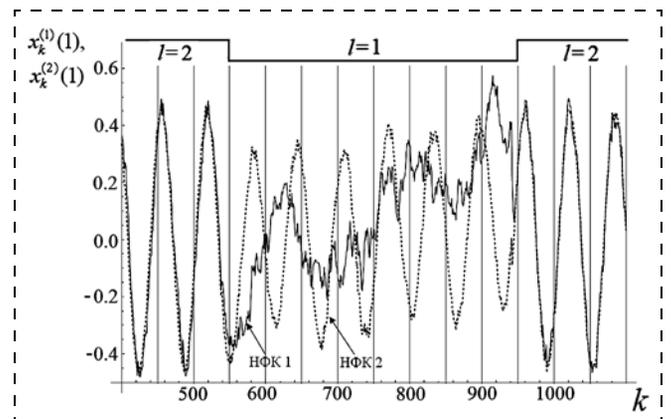


Рис. 4

протяжении всего времени работы алгоритма идентификации.

В качестве интересной особенности приведенных графиков можно отметить существенную схожесть значений оценок для различных НФК, имеющую место при реализации структуры с номером $l = 2$, что, значительно уменьшая абсолютную разницу сравниваемых при минимизации значений усредненной АКФ $\bar{C}_k^{(1)}$ и $\bar{C}_k^{(2)}$, в то же время, как показано ниже, не оказывает принципиального влияния на корректность принятия окончательного решения относительно оцениваемого номера структуры объекта.

Наглядным подтверждением этого является представленная на рис. 5 зависимость значений критериальных функций $Q_k^{(l)}$ от номера шага работы алгоритма с отмеченными моментами изменения значений оценок номера структуры, принятие решения о которых осуществлялось в соответствии с предложенным критерием минимума АКФ невязки (8).

На рис. 6 проиллюстрирована эффективность работы предлагаемого алгоритма идентификации сопоставлением на одной временной шкале полученных оценок структуры \hat{l}_k и их истинных значений l_k , использовавшихся при моделировании случайного процесса смены структур (см. рис. 3).

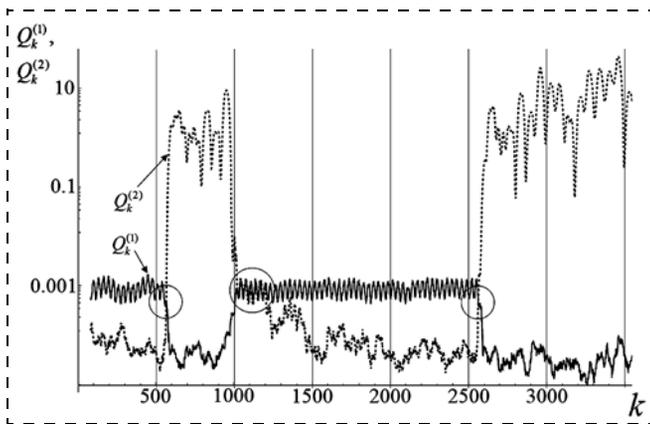


Рис. 5

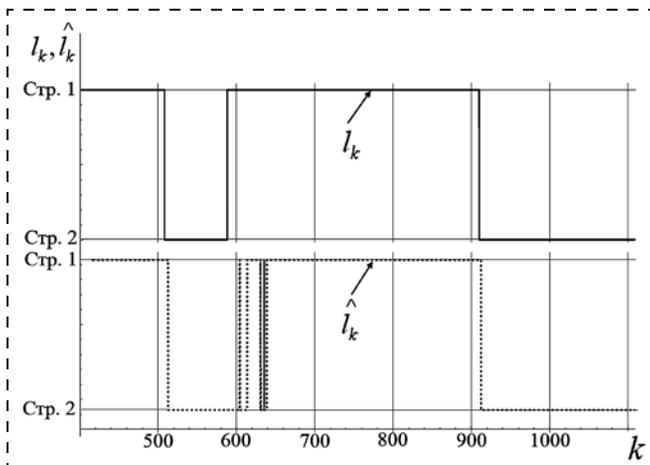


Рис. 6

Анализ представленных на рис. 6 зависимостей показывает, что различия в значениях номеров структур, определенных в соответствии с предложенным алгоритмом, и их истинных значений имеют место лишь на некотором относительно небольшом интервале работы алгоритма, следующем непосредственно за событием очередной смены структуры объекта. При этом следует отметить, что при переходе объекта из структуры 2 в структуру 1 этот интервал составляет всего около 10...20 шагов работы алгоритма.

Заключение

Анализ характерных особенностей рассмотренного подхода к структурной идентификации нелинейных дискретных динамических многоструктурных стохастических объектов позволяет выделить следующие его преимущества перед существующими методами:

- 1) инвариантность к виду закона случайной смены структур объекта;
- 2) возможность использования для нелинейных динамических объектов произвольного вида;
- 3) простоту вычисления критерия идентификации, обуславливающую высокую вычислительную эффективность и точность процедуры структурной идентификации.

Подобные преимущества предложенного подхода, проиллюстрированные численным экспериментом, обеспечивают возможности его эффективного использования в самом широком спектре технических приложений: навигации, связи, космических исследованиях и т. д.

Список литературы

1. Варакин Л. Е. Теория систем сигналов. М.: Сов. радио, 1978. 304 с.
2. Соловьев Ю. А. Спутниковая навигация и ее приложения. М.: Эко-Трендз, 2003. 270 с.
3. Ярлыкова С. М. Математические модели принимаемых шумоподобных сигналов в спутниковых системах мобильной связи с кодовым разделением каналов // Радиотехника. 2002. № 12. С. 27—35.
4. Карабутов Н. Н. Структурная идентификация систем: Анализ динамических структур. М.: МГИУ, 2008. 159 с.
5. Артемьев В. М. Теория динамических систем со случайными изменениями структуры. Мн.: Высшая школа, 1979. 160 с.
6. Казаков И. Е., Артемьев В. М. Оптимизация динамических систем случайной структуры. М.: Наука, 1980. 384 с.
7. Хуторцев В. В., Соколов С. В., Шевчук П. С. Современные принципы управления и фильтрации в стохастических системах. М.: Радио и связь, 2001.
8. Ronghua Guo. Interacting Multiple model particle-type filtering approaches to ground target tracking // Journal of Computers. 2008. V. 3, N. 7. P. 23—30
9. Gordon N. J., Salmond D. J., Smith A. F. M. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation // IEE Proceedings-F. 1993. V. 140, N. 2. P. 107—113.
10. Doucet A., Godsill S., Andrieu C. On sequential Monte-Carlo sampling methods for Bayesian filtering. 2000. V. 10, N. 3. P. 197—208
11. Кошаев Д. А. Многоальтернативный метод обнаружения и оценки нарушений на основе расширенного фильтра Калмана // Автоматика и телемеханика. 2010. № 5. С. 70—83.
12. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.
13. Пугачев В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. М.: Логос, 2004.

УДК 004.8

В. Ю. Осипов, вед. науч. сотр., д-р техн. наук, проф., osipov_vasily@mail.ru,
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

Развитие процессов обработки информации в ассоциативных интеллектуальных машинах

Рассмотрен усовершенствованный метод обработки информации в ассоциативных интеллектуальных машинах (АИМ), построенных на основе рекуррентных нейронных сетей (РНС) с управляемыми синапсами. Предложено наделять АИМ тремя сигнальными системами. Уточнена модель управляемых синапсов. Введены зависимости между формами и направлениями ассоциативного взаимодействия сигналов в РНС и текущими состояниями ее слоев. Показано, что за счет изменения этих форм и направлений можно обеспечивать глубокое развитие процессов обработки информации в АИМ.

Ключевые слова: ассоциативная интеллектуальная машина, нейронная сеть, сигналы, обработка

V. Yu. Osipov

Development of Information Processing in Associative Intelligent Machines

The advanced method of information processing in associative intelligent machines (AIM) constructed on the basis of the recurrent neural networks (RNN) with operated synapses is considered. It is offered to allocate AIM with three signals systems. The model of operated synapses is specified. Dependences between forms and the directions of associative interaction of signals into RNN and current states of its layers are entered. It is shown that due to change of these forms and the directions it is possible to provide deep development of processing of information in AIM.

Keywords: associative intelligent machine, neural network, signal, processing

Введение

Большой научный и практический интерес представляет создание ассоциативных интеллектуальных машин (АИМ), способных решать широкий спектр трудноформализуемых творческих задач. Нужны АИМ, сравнимые по интеллекту с человеком, способные действовать вместо него в удаленных, труднодоступных, опасных для жизни и здоровья средах. Наличие таких машин позволит существенно совершенствовать созидательную деятельность на Земле, а также расширить возможности человека по изучению и освоению космоса.

Известен ряд решений, посвященных созданию АИМ [1–5]. Основу известных АИМ составляет совокупность взаимосвязанных датчиков, нейронной сети и исполнительных устройств. Именно на нейронные сети возлагаются большие надежды по реализации интеллектуальных ядер АИМ. В работах [6, 7] предложено создавать такие ядра на базе рекуррентных нейронных сетей (РНС) с управляемыми синапсами. В этих РНС при передаче сигналов от слоя к слою осуществимы их сдвиги вдоль

слоев. За счет этого, а также за счет приоритетности коротких связей и цикличности обмена информацией между слоями РНС наделяются прозрачными логическими структурами. Осуществимо также варьирование параметрами расходимости сигналов и направлениями их ассоциативного взаимодействия в сети. Показано [8–9], что на таких сетях реализуемы не только первая, но и вторая сигнальные системы АИМ. Наличие второй сигнальной системы у АИМ позволяет увеличить глубину интеллектуальной обработки информации, исключить подавление обратных результатов распознавания сигналов входным потоком.

Несмотря на достигнутые результаты, известные АИМ не совершенны. Не предусмотрена управляемая развязка интеллектуального ядра АИМ с исполнительными устройствами. Во многом не исследованы аспекты саморазвития процессов обработки информации в этих машинах. В частности, не проработаны вопросы о целесообразных формах и направлениях ассоциативного взаимодействия сигналов в АИМ. В зависимости от этих форм и направлений как некоторых функций от текущих

состояний слоев РНС процессы обработки сигналов в АИМ могут развиваться по-разному. Желательно, чтобы такое развитие по функциональности соответствовало процессам мышления, свойственным человеку.

В статье рассматриваются решения, позволяющие в некоторой мере устранить отмеченные недостатки, расширить интеллектуальные возможности АИМ.

Постановка задачи

Известна АИМ с двумя сигнальными системами [8, 9]. Первая сигнальная система АИМ отвечает за формирование "условно-рефлекторных" связей и реакций по результатам воздействия входных сигналов, а вторая — за интеллектуальную обработку информации. В состав этой АИМ входит двухслойная РНС с управляемыми синапсами. Структура ее приведена на рис. 1, где ЕЗ — единичные задержки. В этой сети входные сигналы представляют в виде последовательных совокупностей единичных образов (ЕО) в соответствии с предварительно заданными правилами распознавания с учетом обратных результатов обработки. При передаче совокупностей ЕО от слоя к слою в РНС с учетом текущих состояний слоев: сдвигают эти совокупности и продвигают их вдоль слоев; изменяют форму поперечных сечений расходящихся ЕО; поворачивают ЕО вокруг направлений передачи. Однако при приеме совокупностей ЕО в РНС не предусмотрена их управляемая пространственная селекция.

Для реализации второй сигнальной системы формируют и обрабатывают копии сигналов с учетом изменения форм поперечных сечений расходящихся ЕО и их поворотов вокруг направлений передачи. Для обеспечения такого копирования и стимулирования второй сигнальной системы используют вспомогательный маломощный шум. В качестве результатов обработки информации выступают последовательные совокупности ЕО на выходном слое сети после обратного преобразования в соответствующие им исходные сигналы. При этом в АИМ отсутствует управляемый отрыв РНС от исполнительных устройств. В известной АИМ нет возможности сначала все "обдумать", а затем действовать. Действия АИМ напрямую отражают все ее "мысли", что нежелательно, так как не все они должны реализовываться.

Даже при наличии этих недостатков, если выполняются определенные условия, то процессы обработки информации в такой АИМ могут успешно развиваться. Среди таких условий — необходимые зависимости форм и направлений ассоциативного взаимодействия ЕО от текущих состояний слоев РНС. Варьируя этими формами и направлениями, можно усиливать или ослаблять циклический вызов информации из памяти РНС АИМ, избирательно обрабатывать различные сигналы, формировать новые динамические образы. Однако открытым ос-

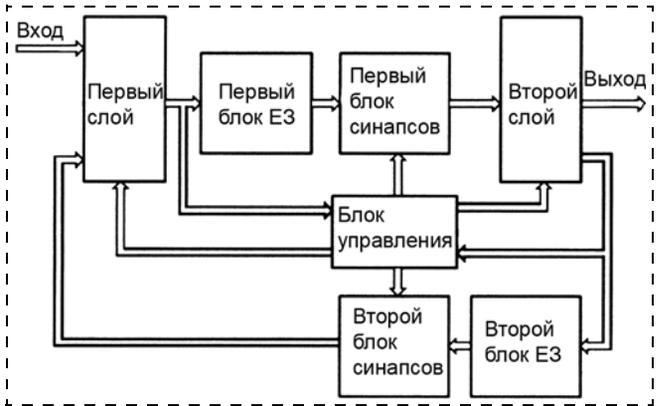


Рис. 1. Рекуррентная нейронная сеть с управляемыми синапсами

тавлен вопрос, какими должны быть эти зависимости, чтобы выйти на более высокий уровень интеллектуальной обработки информации в АИМ.

Необходимо усовершенствовать АИМ, обеспечить успешное развитие процессов обработки информации для формирования полноценного интеллекта машины на основе воспринимаемых из внешней среды сигналов, отражающих закономерности реального мира.

Метод обработки информации в АИМ

Для решения поставленной задачи рассмотрим усовершенствованный метод обработки информации в АИМ. В общем виде этот процесс можно представить схемой, отраженной на рис. 2, где $s(t)$ — входной

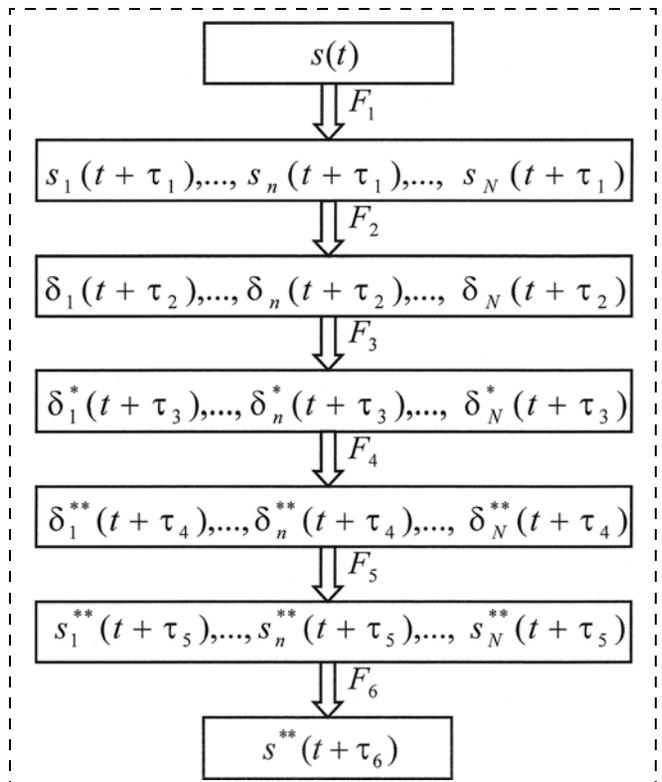


Рис. 2. Структура процесса обработки информации в ассоциативной интеллектуальной машине

сигнал, представляющий смесь полезного сигнала с шумом; $s_1(t + \tau_1), \dots, s_n(t + \tau_1), \dots, s_N(t + \tau_1)$ — составляющие, на которые разложен входной сигнал; $\delta_1(t + \tau_2), \dots, \delta_n(t + \tau_2), \dots, \delta_N(t + \tau_2)$ — последовательности ЕО с частотами повторения как функциями от амплитуд соответствующих составляющих; $\delta_1^*(t + \tau_3), \dots, \delta_n^*(t + \tau_3), \dots, \delta_N^*(t + \tau_3)$ — копии последовательностей ЕО, формируемые и обрабатываемые в РНС с учетом изменения форм поперечных сечений расходящихся и сходящихся ЕО, их поворотов вокруг направлений передачи и приема; $\delta_1^{**}(t + \tau_4), \dots, \delta_n^{**}(t + \tau_4), \dots, \delta_N^{**}(t + \tau_4)$ — копии копий последовательностей ЕО, формируемые в РНС с учетом изменения пространственных параметров ЕО в зависимости от текущих состояний слоев; $s_1^{**}(t + \tau_5), \dots, s_n^{**}(t + \tau_5), \dots, s_N^{**}(t + \tau_5)$ — составляющие результатов обработки информации; $s^{**}(t + \tau_6)$ — результаты обработки (выходные сигналы); τ_1, \dots, τ_6 — временные задержки; F_1, \dots, F_6 — реализуемые АИМ обобщенные функции по интеллектуальной обработке информации.

Если рассматривать этот процесс обработки информации в дискретном времени, то все отраженные на рис. 2 совокупности последовательностей ЕО представляют собой последовательности совокупностей ЕО.

Отличие этой схемы от известных решений [8—10] состоит в том, что результаты обработки информации формируют из вторых копий последовательных совокупностей ЕО. Кроме этого, учитываются возможности изменения пространственных параметров не только расходящихся, но и сходящихся ЕО. Фактически, это АИМ не с двумя, а с тремя

сигнальными системами. Третья сигнальная система АИМ отвечает за управление исполнительными устройствами. Для реализации такого процесса обработки информации в АИМ предлагается РНС с тремя сигнальными системами. Пример простой структуры такой РНС на уровне нейросетевых каналов продвижения совокупностей ЕО приведен на рис. 3, а, б, где 1 — вспомогательные каналы (фильтры) пропускающие совокупности ЕО, относящихся к маломощному шуму; 2 — основные ассоциативные взаимодействия ЕО (формы и направления этих взаимодействий можно изменять в зависимости от текущих состояний слоев сети); 3 — направления продвижения совокупностей ЕО вдоль слоев по нейросетевым каналам; СС — сигнальная система. Рис. 3, а отражает вид сверху на первый слой РНС, а рис. 3, б — продольный разрез первой сигнальной системы РНС по двум слоям (стрелками на этом рисунке показаны направления передачи совокупностей ЕО между слоями).

В соответствии с рис. 3, а входные совокупности ЕО поступают в первую сигнальную систему РНС. Она представляет собой частную рекуррентную двухслойную сеть, связанную вспомогательным каналом 1 и синапсами нейронов со второй частной РНС — второй сигнальной системой. Выделяемые за счет вспомогательного канала совокупности ЕО, относящиеся к маломощному шуму, продвигаются некоторое время в одном и том же направлении по первой и второй СС. За счет этого между первой и второй СС устанавливаются прочные ассоциативные связи. Эти связи позволяют формировать во второй СС копии полезных сигналов и затем их обрабатывать.

Формирование этих копий и их обработка должны осуществляться с учетом изменения форм поперечных сечений расходящихся и сходящихся ЕО, а также поворотов их вокруг направлений передачи и приема, в зависимости от текущих состояний слоев. Посредством этого во второй сигнальной системе (второй частной двухслойной РНС) могут формироваться продолжительные циклические процессы глубокой обработки информации без подавления их входным потоком. Предусматривается также преобразование в выходные сигналы не всех результатов обработки последовательных копий ЕО во второй СС, а лишь значимых. В интересах этого с учетом текущих состояний слоев следует формировать вторые копии последовательных совокупностей ЕО в третьей частной двухслойной РНС (третьей сигнальной системе). Именно эти копии затем рекомендуется преобразовывать в соответствующие им исходные сигналы. За

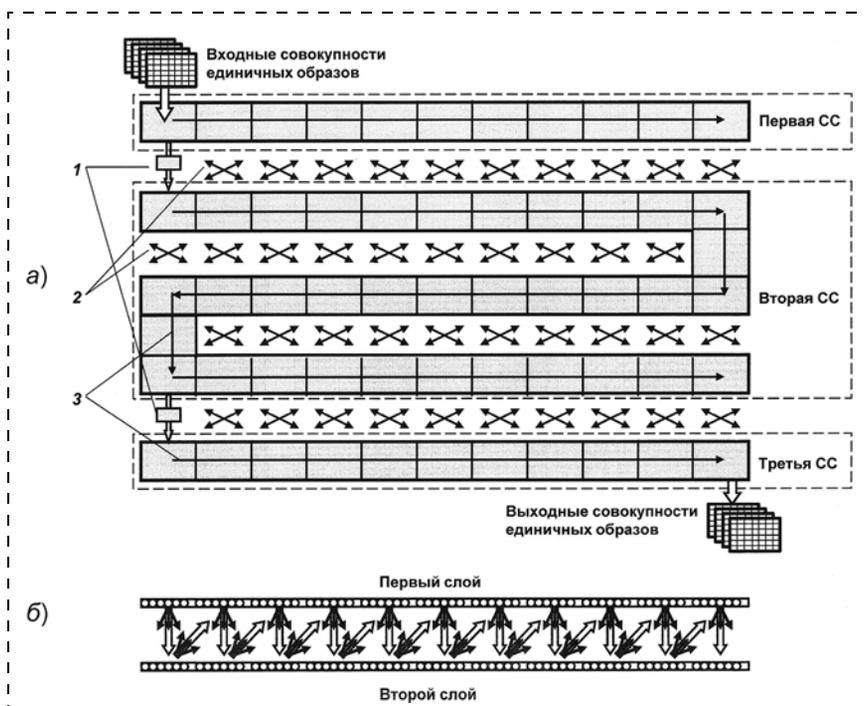


Рис. 3. Структура рекуррентной нейронной сети с тремя сигнальными системами на уровне нейросетевых каналов продвижения совокупностей единичных образов

счет этого вторая сигнальная система при необходимости может функционировать, ничем себя временно не проявляя в виде воздействий на третью сигнальную систему и, соответственно, на исполнительные устройства. Заметим, что первая и третья сигнальные системы, так же, как и вторая, могут иметь свои спиральные структуры и частично формировать циклические процессы по предварительной и окончательной обработке информации.

Модель управляемых синапсов РНС

Для реализации РНС и АИМ с тремя сигнальными системами, а также расширения возможностей по изменению форм и направлений ассоциативного взаимодействия сигналов предлагается уточнить модель управляемых синапсов нейронов. В известной модели [9] прямые $w_{ij}(t)$ и обратные $w_{ij}^*(t)$ веса (проводимости) синапсов определяются как $w_{ij}(t) = k_{ij}(t)\beta_{ij}(r_{ij}(t), G_{ij}(t))$, $w_{ij}^*(t) = k_{ij}^*(t)\beta_{ij}(r_{ij}(t), G_{ij}(t))$, где $k_{ij}(t)$, $k_{ij}^*(t)$ — весовые коэффициенты, зависящие от протекания через синапсы импульсного тока в прямом и обратном направлениях, выступающие в качестве элементов долговременной памяти сети; $\beta_{ij}(r_{ij}(t), G_{ij}(t))$ — функция ослабления, зависящая от удаленности $r_{ij}(t)$ связываемых через синапсы нейронов и направленности $G_{ij}(t)$ форм поперечных сечений расходящихся ЕО на текущий момент времени t . При этом

$$\beta_{ij}(r_{ij}(t), G_{ij}(t)) = 1/(1 + \vartheta r_{ij}^h(t)/G_{ij}(\varphi_{ij} + \psi_i(\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t}))), \quad (1)$$

где ϑ — положительный коэффициент; h — степень; $\psi_i(\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t})$ — угол поворота сформированного i -м нейроном расходящегося ЕО вокруг направления его передачи (поворота формы поперечного сечения) в зависимости от текущих состояний \mathbf{x}_{1t} , \mathbf{x}_{2t} первого и второго слоев сети; φ_{ij} — исходный угол отклонения ij -й связи от опорной оси. Пространственные сдвиги совокупностей ЕО вдоль слоев реализуются путем изменения удаленностей $r_{ij}(t)$ связываемых через синапсы нейронов. Уровни ассоциативного взаимодействия ЕО могут изменяться через варьирование коэффициентом ϑ .

В предлагаемой модели прямые и обратные веса (проводимости) синапсов, в отличие от (1), рекомендуется определять с учетом дополнительной функции $\eta_{ij}(r_{ij}^*(t), G_{ij}^*(t))$ ослабления сходящихся ЕО:

$$w_{ij}(t) = k_{ij}(t)\beta_{ij}(r_{ij}(t), G_{ij}(t))\eta_{ij}(r_{ij}^*(t), G_{ij}^*(t)); \quad (2)$$

$$w_{ij}^*(t) = k_{ij}^*(t)\beta_{ij}(r_{ij}(t), G_{ij}(t))\eta_{ij}(r_{ij}^*(t), G_{ij}^*(t)). \quad (3)$$

Функция $\eta_{ij}(r_{ij}^*(t), G_{ij}^*(t))$ в (2), (3) зависит от удаленности $r_{ij}^*(t)$ связываемых через синапсы нейро-

нов и направленности $G_{ij}^*(t)$ форм поперечных сечений (ПС) сходящихся ЕО на текущий момент времени t . Эта удаленность и направленность определяется относительно принимающих нейронов. В качестве $\eta_{ij}(r_{ij}^*(t), G_{ij}^*(t))$ в ряде случаев применимы известные радиальные функции: Габора, Гаусса, обратная мультикватратичная и другие [2]. При этом использование $\eta_{ij}(r_{ij}^*(t), G_{ij}^*(t))$ в сочетании с $\beta_{ij}(r_{ij}(t), G_{ij}(t))$ должно исключать пространственные сдвиги ПС сходящихся ЕО. Пространственные сдвиги реализуются только для ПС расходящихся ЕО. Однако можно изменять форму и направленность ПС сходящихся ЕО в зависимости от текущих состояний слоев. В результате осуществимо успешное двухстороннее управление ассоциативным взаимодействием ЕО в РНС без нарушения однозначного соответствия между входом и выходом АИМ.

Варьирование пространственными параметрами как расходящихся, так и сходящихся ЕО осуществимо за счет изменения по соответствующим правилам проводимостей синапсов.

Условия успешного развития процессов обработки информации АИМ

Для успешного развития процессов в АИМ необходимо, чтобы она имела в своей памяти начальные представления об окружающем мире. Формально они могут быть заложены в машину при ее создании или введены при ее начальном обучении. Наибольшие эффекты ассоциативного взаимодействия сигналов в АИМ могут быть достижимы, когда ПС расходящихся и сходящихся ЕО в РНС ориентированы, соответственно, на энергетические минимумы принимающего слоя и энергетические максимумы передающего слоя. Полагается, что пространственные сдвиги ЕО в РНС уже устоялись и фиксированы.

Удаленность локальных и глобальных энергетических максимумов и минимумов от передающих и принимающих нейронов может быть различной. Кроме изменения числа и местоположения этих экстремумов меняются во времени и их значения. Все это должно учитываться при формировании форм ПС расходящихся и сходящихся ЕО.

С учетом этого при программной реализации АИМ одним из возможных подходов к определению коэффициентов направленности форм ПС расходящихся и сходящихся ЕО может выступать следующее решение. Согласно ему каждое ПС с известным центром вращения разбивается на S одинаковых секторов, составляющих в сумме 360° . Для каждого s -го сектора ПС расходящегося (сходящегося) ЕО оценивается показатель Q_s (Q_s^*):

$$Q_s^{(*)} = \sum_{z=1}^{Z_s^{(*)}} \frac{u_{sz}^{(*)}}{l_{sz}^{(*)2}}, \quad (4)$$

где u_{sz} — текущий энергетический провал на входе z -го нейрона принимающего слоя в s -м секторе ПС расходящегося ЕО с учетом возможной компенсации этого провала другими ЕО; $u_{sz}^{(*)}$ — текущий потенциал на выходе z -го нейрона передающего слоя в s -м секторе ПС сходящихся ЕО; l_{sz} — расстояние до z -го нейрона принимающего слоя в s -м секторе ПС расходящегося ЕО от нейрона, являющегося центром вращения этого поперечного сечения; $l_{sz}^{(*)}$ — расстояние до z -го нейрона передающего слоя в s -м секторе ПС сходящихся ЕО от нейрона (передающего слоя), сгенерировавшего анализируемый расходящийся ЕО; Z_s, Z_s^* — число нейронов в s -м секторе ПС, соответственно, расходящегося и сходящихся ЕО. Учет возможной компенсации энергетических провалов на входе z -х принимающих нейронов предусматривает тот факт, что они могут быть устранены ЕО, проходящими по коротким синапсам.

Затем для анализируемых секторов определяются относительные коэффициенты G_s, G_s^* направленности форм ПС, соответственно, расходящихся и сходящихся ЕО,

$$G_s^{(*)} = Q_s^{(*)} / \sum_{s=1}^S Q_s^{(*)}. \quad (5)$$

Такой подход позволяет не задаваться изначально конкретными формами ПС расходящихся и сходящихся ЕО, а гибко формировать их в процессе обработки сигналов в зависимости от текущих состояний слоев РНС и определять соответствующие

коэффициенты $G_{ij}(t)$ и $G_{ij}^*(t)$, входящие в (2), (3). В общем случае эти формы ПС являются многолепестковыми и ориентируются согласно экстремальным критериям, обеспечивающим успешное глубокое развитие процессов обработки сигналов в АИМ без разрушения их структуры.

В частном случае, когда заданы, например, эллиптические формы таких ПС со смещенным центром вращения, можно находить лишь приоритетные направления их ориентации, для которых показатель (4) максимален:

$$Q_o^{(*)} = \max_s Q_s^{(*)}.$$

Результаты моделирования

Для подтверждения преимуществ предлагаемых решений по сравнению с известными подходами были приведены вычислительные эксперименты, разработана усовершенствованная программная модель двухслойной РНС с числом нейронов в каждом слое 2016 единиц. Исследовали возможность формирования различных форм ПС расходящихся и сходящихся ЕО в зависимости от текущих состояний слоев сети. Оценивали эффекты по ассоциативному вызову информации из памяти РНС в зависимости от этих форм. Установлено, что использование дополнительной пространственной селекции совокупностей ЕО в РНС при их приеме расширяет функциональные возможности сети и АИМ в целом, причем для сходящихся ЕО ориентация форм ПС на энергетический максимум передающего слоя при

одних и тех же условиях позволяет увеличить число ЕО, вызываемых ассоциативно из памяти РНС. Также число вызываемых из памяти ЕО увеличивается, когда формы ПС расходящихся ЕО ориентируются на энергетический минимум принимающего слоя. Однако для получения форм ПС сходящихся и расходящихся ЕО в зависимости от текущих состояний слоев РНС требуются дополнительные существенные вычислительные ресурсы. Сложность задачи в четыре раза больше, чем при моделировании прототипа [8, 9]. Для каждого передающего и принимающего нейрона требовалось формировать свои ПС, соответственно, расходящихся и сходящихся ЕО. Примеры сглаженных форм ПС расходящихся и сходящихся ЕО, сформированных согласно (4), (5) с учетом текущих состояний слоев сети, приведены на рис. 4, где 1 — возбужденный нейрон, для которого показано ПС расходящегося от него ЕО, обозначенное цифрой 4; 2 — ПС сходящихся к нейрону 3 ЕО

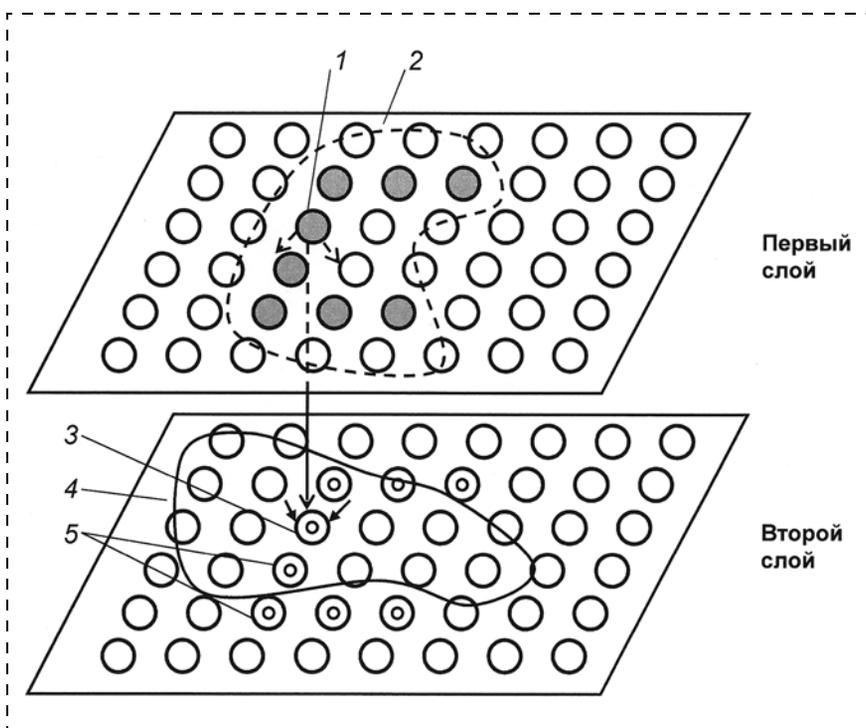


Рис. 4. Примеры сглаженных форм поперечных сечений расходящихся и сходящихся единичных образов, сформированных с учетом текущих состояний слоев сети

от возбужденных нейронов первого слоя; 5 — нейроны второго слоя, связанные с возбужденными нейронами первого слоя короткими синапсами. При построении ПС все пространство делилось на восемь одинаковых секторов. Из анализа рис. 4 видно, что в зависимости от текущих состояний слоев сети формы ассоциативного взаимодействия сигналов могут существенно изменяться и обеспечивать развитие процессов обработки информации в ней на значительную глубину в различных направлениях. При этом за счет коротких связей сохраняется однозначность соответствия между входом и выходом РНС и самой АИМ.

Выделение из входного сигнала маломощного шума имитировали прореживанием последовательных совокупностей ЕО. Для такого прореживания достаточно использовать вспомогательные нейроны с большим временем невосприимчивости их после возбуждения. Подтверждено, что вторые копии сигналов могут успешно формироваться, как и первые, с учетом изменения форм и ориентации ПС расходящихся и сходящихся ЕО.

Заключение

В результате выполненного исследования усовершенствован метод обработки динамических сигналов в АИМ. Рекомендовано наделять АИМ не только второй, но и третьей сигнальной системой, ответственной за управление исполнительными устройствами. Уточнена модель управляемых синапсов. Введены зависимости между формами ПС расходящихся и сходящихся ЕО в РНС и текущими состояниями слоев сети.

Предложенные решения позволяют понять, как могут развиваться процессы глубокой обработки информации в АИМ без разрушения структур сигналов. Наличие дополнительных возможностей РНС АИМ по гибкому формированию различных форм ПС расходящихся и сходящихся ЕО в зависимости от текущих состояний слоев существенно увеличивает внутреннее пространство состояний этих машин. Кроме этого, возможно установление более прочных пространственно-временных ассоциатив-

ных связей между обрабатываемыми сигналами, отражающими закономерности реального мира. В целом, это позволяет расширить возможности АИМ по интеллектуальной обработке различных динамических сигналов.

Для практической реализации таких АИМ нужны технологии, позволяющие оперативно реализовывать свойственные им функции. В качестве таких технологий из-за вычислительной сложности задачи предпочтение следует отдавать не цифровой, а аналоговой реализации РНС АИМ. В частности, нейроны РНС могут быть реализованы ждущими мультивибраторами, а синапсы могут реализовываться на основе мемристоров и управляемых аттенюаторов.

Полученные результаты по совершенствованию АИМ могут быть использованы при создании перспективных интеллектуальных машин и систем, способных успешно решать трудно формализуемые творческие задачи.

Список литературы

1. Galushkin A. I. *Neural Networks Theory*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 396 p.
2. Хайкин С. *Нейронные сети: полный курс*. 2-е изд.: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 1103 с.
3. Осовский С. *Нейронные сети для обработки информации*. Перевод с польского И. Д. Рудницкого. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
4. Palm G. *Neural associative memories and sparse coding* // *Neural Networks*. 2013. N. 37. P. 165—171.
5. Pentti O. A. Haikonen. *The Role of Associative Processing in Cognitive Computing* // *Cognitive Computing*. 2009. N 1. P. 42—49.
6. Осипов В. Ю. *Ассоциативная интеллектуальная машина* // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2010. № 2. С. 59—67.
7. Осипов В. Ю. *Метод настройки ассоциативной интеллектуальной системы на входные сигналы* // *Информационные технологии*. 2012. № 9. С. 54—59.
8. Осипов В. Ю. *Ассоциативная интеллектуальная машина с двумя сигнальными системами* // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. № 8. С. 17—22.
9. Осипов В. Ю. *Рекуррентная нейронная сеть с двумя сигнальными системами* // *Информационно-управляющие системы*. 2013. № 4. С. 8—15.
10. Осипов В. Ю. *Прямое и обратное преобразование сигналов в ассоциативных интеллектуальных машинах* // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2010. № 7. С. 27—32.

УДК 004.896, 62-546.8, 62-236.58

И. А. Щербатов, канд. техн. наук, доц., **И. О. Проталинский**, аспирант, **В. А. Бородин**, магистрант,
Астраханский государственный технический университет

Система интерпретирования голосовых команд для управления мобильным роботом

Представлен обзор современных систем и методов голосового управления роботами различного назначения и средств организации человеко-машинного взаимодействия с помощью голоса. Рассмотрены вопросы интерпретирования голосовых команд, подаваемых роботу на русском языке с применением ограниченного набора команд, а также на естественном языке. Разработана архитектура системы интерпретирования голосовых команд для управления мобильным роботом, включающая основные компоненты системы, синтаксис голосовых команд, представление информации в системе, алгоритмы работы. Представлены примеры, показывающие эффективное применение разработанной системы.

Ключевые слова: мобильный робот, интерпретатор команд естественного языка, голосовое управление

I. A. Shcherbatov, I. O. Protalinskii, V. A. Borodin

The System of Interpreting of Voice Commands for Control a Mobile Robot

The review of modern systems and methods of voice-controlled robot for different purposes and means of the organization of human-machine interaction using voice, has been submitted. The problems of interpreting voice commands from the robot in Russian using a limited set of commands, as well as in natural language, has been discussed. The architecture of the system interpret voice commands to control mobile robot, which includes the main components of the system, voice commands, syntax, presentation of information in the system algorithms, has been developed. The examples showing the effective application of the developed system.

Keywords: mobile robot, the command interpreter of natural language, voice control

Введение

Удобство применения голосового управления в человеко-машинном взаимодействии обуславливает его широкое развитие и повсеместное внедрение. Управление робототехническими системами с помощью голосовых команд является очень актуальным, данному направлению посвящено значительное число работ. В работе [1] представлена технология ввода и задания рабочих точек перемещения робота. Применение голосового интерфейса для управления мобильным роботом рассмотрено в работах [2, 3], исследование вопросов распознавания команд при наличии различных видов шумов, в том числе с применением цифровой обработки сигналов, отражено в статьях [4, 5]. Примером реализации данного класса систем являются робот-погрузчик для работы в складских помещениях [6], робот-гид для мест массового скопления людей [7], хват для перемещения объектов [8], роботы специального назначения [9]. Для распознавания голосовых команд применяются нейронные сети и DTW (Dynamic Time Warping — динамическая трансформация шкалы времени) [10], скрытые марковские модели [11] и пр.

Однако вопросы голосового управления и интерпретирования голосовых команд для управления

робототехническими системами с учетом особенностей русского языка рассмотрены не достаточно полно. Поэтому создание такой системы является актуальной задачей.

Особенности голосового управления мобильными роботами

Голосовое управление позволяет повысить интерактивность работы пользователя с роботом, минимизировать графический интерфейс, ускорить ввод текстовой информации. Распознавание речи используется в таких роботах, как iRobot Ava, Honda Asimo, Sony AIBO, Metrolab Scitos A5 и многих других.

Голосовое управление позволяет существенным образом увеличить число пользователей мобильного робота, так как не предполагает специальных знаний в области человеко-машинного взаимодействия, изучения особенностей интерфейса управления и пр. Однако при таком подходе возникает необходимость создания системы распознавания голоса и реализации системы интерпретирования распознанной голосовой команды для исполнения ее роботом.

Существуют несколько подходов к обработке голосового запроса: без интерпретирования; с фик-

сированным синтаксисом; с обработкой естественного языка. В первом случае достаточно определить текст голосового управления (в интерпретации нет необходимости). Пример данной системы — программа голосового поиска VoiceSearch¹, перенаправляющая запрос в поисковую систему. Система с фиксированным синтаксисом предусматривает ограниченный набор команд для управления, например "FordSync", которая позволяет управлять телефоном и проигрывателем в автомобиле. Кондиционер DaiseikaiVoiCE NDR² от Toshiba предоставляет пользователю около 20 команд для управления. Системы с фиксированным синтаксисом получили распространение и у производителей телевизоров. Устройство Samsung SMART TV³ совмещает голосовое управление с фиксированными командами с распознаванием жестов и лица. Для персональных компьютеров существуют специальные приложения, управляющие некоторыми функциями операционной системы либо сторонних приложений (например, DragonNaturallySpeaking).

Использование обработчика естественного языка позволяет не ограничивать систему команд специализированным синтаксисом. Однако это сложный алгоритмический процесс, требующий большой базы знаний. Поэтому некоторые программы используют уже готовые средства обработки естественного языка. Например, мобильный ассистент Siri использует систему WolframAlpha для обработки запросов на естественном языке.

Целью данной работы является разработка архитектуры системы голосового управления мобильного робота-консультанта для улучшения интерактивности взаимодействия между роботом и пользователем, которая должна позволять решить следующие задачи: управление движением робота, управление элементами интерфейса, ответы робота на простейшие вопросы. Кроме того, при разработке необходимо решить проблемы уточнения обработанного текста (чтобы учесть ошибки при распознавании) и интерпретации обработанного текста.

Запись голоса является технически простой задачей, а для распознавания и синтеза голоса выбраны http-запросы к серверам компании Google. Это позволяет распознавать и синтезировать речь, не прибегая к сложным и ресурсоемким локальным системам. Распознавание и синтез речи от компании Google реализованы для большого числа языков, что облегчает локализацию системы. Использование библиотеки Qt для реализации http-запросов и воспроизведения звуковых файлов улучшает переносимость системы на другие платформы. Простота и требуемая точность голосового распознава-

¹ Приложение доступно на Google Play по ссылке <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.voice-search>

² Описание представлено на сайте <http://www.air-s.ru/pages/show.php?id=114>

³ Информация представлена на сайте производителя <http://www.samsung.com/ru/SmartTV/>

ния позволяет свести задачу обработки голосового управления к обработке текста.

Для решения поставленной задачи составлен синтаксис голосовых команд управления роботом. Голосовые сообщения условно разделены на два вида: команды и запросы.

Граматику команд можно представить с помощью расширенной формы Бэкуса-Наура (РБНФ) в следующем виде:

<команда>:: = <слово-команда> [<стоп-слово>] {<аргумент>}

<аргумент>:: = <число> | <ключевое слово>

Слово-команда определяет действие, которое должен выполнить робот. Аргументы уточняют действие команды. Они могут быть представлены либо в виде числа, либо в виде ключевого слова. Например, команда "вперед на 2 метра" состоит из слова-команды "вперед", аргументов "2" и "метра". Числовой аргумент определяет расстояние, которое должен проехать робот, а ключевое слово "метр" в данном случае уточняет движение, определив единицу измерения в метрах (в отличие от ключевого слова "сантиметр"). Стоп-слова представляют собой предлоги, необходимые для связи слов в человеческой речи ("на", "в" и т. д.), однако при обработке они опускаются интерпретатором.

Запросы представляют собой аналог вопросительных предложений и имеют следующую грамматику:

<запрос>:: = (<вопрос><объект> {<аргумент>}) | (<вопрос> {<аргумент>})

Вопрос — это вопросительное местоимение (как, когда, где и другие). Объект — это сущность, о которой необходимо узнать информацию (например, в запросе "какая скорость робота?" "робот" — это объект). Аргументы — это свойства объекта ("скорость", "задержка") либо предикаты ("включен"). Ответом на запрос может являться числовое либо строковое значение, а также логическое значение, представленное в виде фраз "Да", "Нет", "Не знаю" (если у объекта нет необходимой информации).

Структура системы интерпретации

Чтобы не привязывать управление роботом к конкретному синтаксису команд, разработана виртуальная машина с собственной системой команд (рис. 1). Система способна транслировать команды с разных естественных языков (русский, английский, французский и т. д.), использовать различные версии интерпретаторов, способы интерпретирования, при этом оставляя общую неизменяемую структуру управления. Подобным образом происходит компиляция программ с различных языков программирования в машинные коды.

Каждая команда виртуальной машины содержит код команды робота и аргумент. В главном цикле обработки команд происходит считывание этих значений из памяти. В зависимости от кода команды



Рис. 1. Структура системы интерпретации



Рис. 2. Пример представления объектов, свойств и предикатов

система запускает какую-либо функцию робота (например, начинает движение вперед). В эту функцию также передается аргумент, полученный из памяти.

Для выполнения поисковых запросов к системе вся необходимая информация представлена в виде объектов и их свойств. Например, необходимо получить информацию о двигателе. Формируется объект "двигатель" и его свойства — "скорость вращения", "задержка приема данных". Аналогично сформированы объекты и свойства для других сущностей,

информацию о которых должна выдавать система (рис. 2).

Помимо свойств в каждом объекте могут быть реализованы функции вычисления значения предикатов (например, предикат "включен" для объекта "двигатель"). Если не реализуется какой-либо предикат для объекта, при запросе к нему система сообщит о том, что у этого объекта нет информации по данному свойству или предикату (аналог естественного ответа "не знаю"). Свойство может быть пустым, для того чтобы система реагировала на односложные предложения ("датчики", "моторы" и т. д.). Такое представление позволяет ответить на

простые вопросы: "какая скорость двигателей?", "какая задержка энкодеров?", "который час?". Отдельно реализуется поддержка вопроса к подлежащему. Чтобы ответить на вопрос "кто", система обходит все объекты и запрашивает у них значение предиката. Если объект отвечает утвердительно, система добавляет его имя в список. Так, на вопрос "Что включено?" (где предикат — "включен") система ответит — "двигатели, энкодеры, датчик".

Так как система интерпретирования является системой с фиксированными синтаксисом и набором команд, то необходим словарь используемых в программе минимальных единиц синтаксиса. В данной системе — это слово либо число. Можно условно разделить все элементы словаря на несколько классов, представив их в виде множества:

$$S = \{Com, W, Num, Q, NoO, PoO, Pd, A, SW\},$$

где *Com* — слова-команды; *W* — ключевые слова; *Num* — числа; *Q* — вопросительные местоимения; *NoO* — названия объектов; *PoO* — свойства объектов; *Pd* — предикаты; *A* — союзы; *SW* — стоп-слова.

Структурируем информацию о ключевых словах в виде кортежа (x, y, z) , где x — это само слово, y — его тип, z — код слова. Слова в словаре уникальны, каждому слову присваивается только один код. Однако для поддержки возможности синонимов может быть несколько слов с одинаковым кодом. Для реализации уточнения команды в системе использован алгоритм поиска с использованием нечеткого сравнения строк, вместо обычного поиска по коллекции.

Для проверки алгоритма поиска в качестве эксперимента была выбрана одна из команд робота — команда "развернись". Она была произнесена 55 раз. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Из 55 слов сервер выдал 13 точных совпадений, система не смогла правильно обработать сообщение в 12 случаях, сообщение обработано правильно в 30 случаях. Таким образом, большая часть сообщений обработана верно.

Затем была выбрана фраза, состоящая из двух слов — "привет робот". Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты тестирования на сообщении "развернись"

Результат распознавания сервером	Число распознаваний	Правильность интерпретирования с помощью нечеткого сравнения строк
"развернись"	13	Да
"вернись"	18	Да
"разверни"	5	Да
"развелись"	3	Да
"зимний"	4	Нет
"правильней"	3	Нет
"верни"	2	Да
"юрий"	2	Нет
"разберись"	1	Да
"жалюзи"	1	Нет
"верхний"	1	Да
"разве они"	1	Нет
"envy"	1	Нет

Таблица 2

Результаты тестирования на сообщении "привет робот"

Результат распознавания сервером	Количество распознаваний	Правильность интерпретирования с помощью нечеткого сравнения строк
"привет робот"	13	Да
"привет рома"	22	Да
"привет ру"	10	Да
"привет"	8	Нет, но работает верно за счет одинаковой реакции робота на фразы "привет" и "привет робот"
"привет работа"	1	Нет
"привет роллы"	1	Да

Примеры синтаксических правил

Голосовая команда	Аргумент голосовой команды	Числовой аргумент	Команда виртуальной машины	Множитель аргумента	Слагаемое аргумента
"вперед"	Нет	Нет	Движение вперед	0	0
"влево"	Нет	Нет	Движение влево	0	0
"стоп"	Нет	Нет	Остановка	0	0
"вперед"	"метр"	Да	Вперед на заданное число метров	1	0
"влево"	"градус"	Да	Поворот влево на заданное число градусов	1	0
"развернись"	Нет	Нет	Поворот на 180 градусов	0	180

Итого, всего 9 сообщений не обработано, точных совпадений — 13, система уточнила 33 сообщения.

Представленный тип поиска позволяет устранить ошибки (например, с неправильным распознаванием окончания слова). Первоначально программа ищет точное совпадение слова со словами из коллекции. Если точного совпадения не найдено, то происходит следующий поиск по массиву, где каждому элементу коллекции ставится в соответствие значение нечеткого сравнения со словом, код которого ищется (рис. 3). Из массива выбирается значение с максимальным результатом сравнения. Таким образом, результатом поиска являются коды значений и классы для каждого из слов в сообщении.



Рис. 3. Алгоритм нечеткого поиска

Таблица 4

Примеры синтаксических правил запросов

Вопросительное местоимение	Наличие объекта	Наличие свойства или предиката
"как"	Да	Да
"как"	Нет	Да
"какой"	Да	Да
"что" (вопрос к подлежащему)	Нет	Да
"когда"	Да	Да
Нет	Да	Да

После разбиения сообщения на лексемы происходит определение типа всего сообщения. На следующем этапе работы необходимо найти результат и в случае команды преобразовать сообщение в команды робота. На этом этапе системе известны только типы каждой из лексем, но не значение команды целиком. Простейшим решением является написание программного кода на разветвляющемся алгоритме. Однако данный способ сложен в реализации. Поэтому для интерпретирования команд выбрана концепция программирования, управляемого данными. Также сообщения были представлены в виде множеств, так как для выбранной системы синтаксиса не важен порядок ввода слов.

Для реализации общего интерпретирования команд выбрана концепция сопоставления с образцом. Синтаксические правила команд могут быть представлены следующим образом:

$$RuleCommand = \{NvcM, Nac, Hn, Cvm, ArgMult, ArgSumm\}, \quad (1)$$

где $NvcM$ — команда голосового сообщения; Nac — аргумент команды; Hn — наличие числового аргумента в голосовом сообщении; Cvm — код команды виртуальной машины, соответствующей голосовому сообщению; $ArgMult$ — множитель аргумента команды виртуальной машины; $ArgSumm$ — слагаемое аргумента команды виртуальной машины.

Аргумент команды виртуальной машины вычисляется по формуле: $ArgVm = ArgMult \cdot x + ArgSumm$, где x — числовой аргумент из голосового сообщения (при его отсутствии $x = 0$). Примеры синтаксических правил представлены в табл. 3.

Представление синтаксиса запросов отличается от представления синтаксиса команд. Описание синтаксиса команд привязано к кодам слов, а описание запросов определяет их типовые конструкции (табл. 4):

$$RuleQuery = \{Q, Ho, Hp\}, \quad (2)$$

где Q — наличие вопросительного местоимения; Ho — наличие объекта; Hp — наличие свойства или предиката.

Все элементы множеств (1) и (2) построены с учетом отсутствия общих элементов, а значит, можно однозначно определить тип полученного

сообщения. Для этого правила представлены в следующем виде:

$$CommonRule = \{OutType, RuleCommand, RuleQuery\},$$

где *OutType* — тип сообщения (команда или запрос).

Программное обеспечение системы интерпретации

В соответствии с поставленными целями и задачами, а также разработанным синтаксисом построен общий алгоритм работы системы (рис. 4), а также ее архитектура (рис. 5).

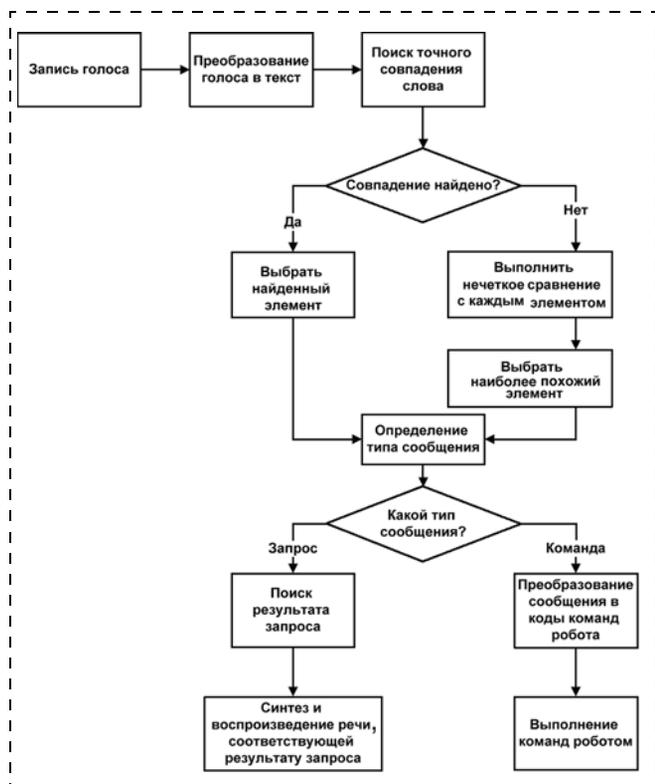


Рис. 4. Общий алгоритм работы системы

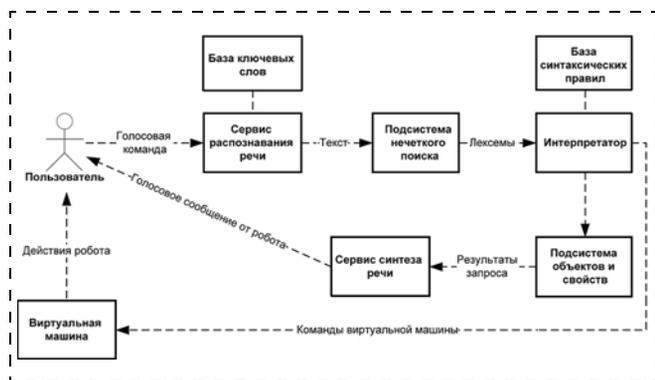


Рис. 5. Архитектура системы

Заключение

Предложенный подход позволяет обеспечить простоту реализации системы интерпретирования голосовых команд для мобильного робота и возможность изменения синтаксиса. Использование виртуальной машины позволяет легко изменить систему интерпретации либо совмещать несколько версий синтаксиса с различным функционалом. Такой подход к построению системы позволяет обеспечить максимально простое и эффективное управление роботом, а также группой роботов [11]. Однако для более сложных конструкций [12] необходимы системы интерпретации грамматики естественного языка, а также построение более сложной и масштабной системы упорядочивания информации.

Список литературы

1. Невлюдов И. Ш., Цымбал А. М., Милотина С. С. Головное формирование управляющих команд робота в САПР технологических процессов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2008. № 2/2 (32). С. 12–14.
2. Yamamoto S., Nakadai K., Valin J., Rouat J., Michaud F., Komatani K., Ogata T., Okuno H. G. Making A Robot Recognize Three Simultaneous Sentences in Real-Time // Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2005.
3. Сухоручкина О. Н. Интеграция компонентов интерфейса пользователя и системы управления персонального мобильного робота: пример реализации // Искусственный интеллект. 2008. № 3. С. 482–489.
4. Coote R. Development of a Voice Control Interface for Navigation Robots and Evaluation in Outdoor Environments // Proc. of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology. 2010. P. 381–388.
5. Proakis J. G., Manolakis D. G. Digital Signal Processing Principles, Algorithms, and Applications. Prentice Hall, 2007.
6. Wurman P. R., D'Andrea R., Mountz M. Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses // AI Magazine. 2008. V. 29, N. 1. P. 9–19.
7. Проталинский И. О., Кирилин С. А., Елизаров Д. В. Универсальная мобильная платформа для роботов, обслуживающих социальную и бытовую сферу // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. Вып. 2. С. 34–38.
8. Shyam. R. Nair, Shalini. R. Nair. Design of a Voice Controlled Robotic Arm for Picking and Placing an Object // IOSR Journal of Engineering. 2012. V. 2 (4). P. 670–673.
9. Jayesh Chopade, Dattatray Barmade, Swapnil Tonde. Control of Spy Robot by Voice and Computer Commands // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2013. V. 2. P. 1835–1837.
10. Cowling M., Sitte R. Analysis of speech recognition techniques for use in a non-speech sound recognition system. URL: <http://www.elec.uow.edu.au/staff/wysocki/dspcs/papers/004.pdf>
11. W. Kusuma R., P. Brave G. V. Simulation voice recognition system for controlling robotic applications // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2012. V. 39, N. 2. P. 188–196.
12. Щербатов И. А., Проталинский И. О. Исследование эффективности группового управления роботами методом имитационного моделирования // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. № 4 (50). С. 34–37.
13. Щербатов И. А. Интеллектуальное управление робототехническими системами в условиях неопределенности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 1. С. 73–77.

А. Н. Горитов, д-р техн. наук, проф., angort@rambler.ru,
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Управление роботом-манипулятором в среде с неполной информацией

Рассмотрена актуальная проблема робототехники — управление роботом-манипулятором с неполной информацией о внешней среде. Выделены две основные задачи — построение топологии внешней среды и планирование действий робота для выполнения поставленной задачи. Первая задача решается с помощью системы технического зрения. Для решения второй задачи используется метод, обеспечивающий построение оптимальных траекторий перемещения исполнительного звена робота в соответствии с выбранным критерием. Классификация объектов внешней среды выполняется с помощью метода Виолы-Джонса.

Ключевые слова: робот, неизвестная среда, техническое зрение, планирование траектории

A. N. Goritov

The Control of a Robot Manipulator in an Environment with Incomplete Information

We consider the actual problem of robotics control of a robot manipulator with incomplete information about the external environment. There are two main objectives — to create a topology of the external environment and planning of actions of the robot's task. Solution of the first problem is solved with the help of the system of technical vision. To solve the second problem we use the method that provides the optimal trajectory and Executive level of the robot in compliance with the selected criterion. Classification of environmental objects is performed using the method Viola-Jones.

Keywords: robot, an unknown environment, technical vision, planning trajectory

Актуальность проблемы

Современное производство характеризуется высокой динамичностью. Переход на выпуск новых изделий требует переналадки всего производственного процесса. Одним из способов сокращения необходимого для этого времени — это разработка и внедрение методов, обеспечивающих функционирование роботов в произвольной внешней среде. Эти методы должны обеспечить самонастройку и адаптацию роботов как к внешней среде, так и к выполняемой операции.

Проблема обеспечения функционирования робота в неизвестной внешней среде является комплексной и требует решения ряда задач. Среди них можно выделить две основные задачи — построение топологии внешней среды и планирование действий робота для выполнения запланированной операции.

Задача построения топологии внешней среды может быть решена с применением систем технического зрения. Эта задача является более общей, чем задачи, обычно решаемые системой технического зрения робота-манипулятора [1, 2], так как требуется не только распознать необходимые детали, но и выделить препятствия, которые необходимо учесть при планировании траектории перемещения робота.

Планирование действий робота заключается в построении траектории перемещения исполнительного звена манипулятора. Эта задача включает в себя планирование траектории перемещения испол-

нительного звена из начального положения в целевое, расчет пространственного расположения звеньев манипулятора, контроль за отсутствием соударений между звеньями и с объектами внешней среды, а также контроль за относительными перемещениями в кинематических узлах. При многократном выполнении запланированной операции вводится дополнительное условие на построение оптимальной траектории по заданному критерию.

Таким образом, для решения проблемы функционирования манипулятора в неизвестной среде необходимо разработать эффективные методы и алгоритмы построения топологии внешней среды с помощью системы технического зрения и построения функций управления приводами для оптимального и безопасного перемещения звеньев манипулятора во внешней среде с априори неполной информацией.

Формирование информации о внешней среде

Техническое зрение в робототехнике применяется для решения следующих задач [3]:

- определение размеров объекта или его элемента;
- определение положения объекта в пространстве;
- определение ориентации объекта;
- определение принадлежности объекта или его элемента к одному из классов из заранее определенного набора классов.

Для решения перечисленных задач разработано большое число различных методов, которые можно

разделить на три класса — интегральные, контурные и характерных точек.

Методы, относящиеся к классу *интегральных*, основаны на классических методах обработки изображения и работают с большим объемом видеоизображения. Считается, что эти методы не обеспечивают необходимую скорость обработки информации для роботов, работающих в реальном масштабе времени.

Контурные методы основаны на том, что на раннем этапе обработки изображения выделяют контуры объектов, находящихся на видеоизображении, и затем используют эту информацию при идентификации объекта. При качественном изображении внешнего пространства робота этот метод позволяет получить полную информацию об объектах внешней среды. При некачественном освещении распознавание объектов может быть затруднено из-за наличия больших теней, а также разрывов в контурах деталей.

Методы, относящиеся к классу *характерных точек*, основаны на размещении сенсоров в заранее рассчитанных точках. Обработка данных с этих датчиков позволяет идентифицировать деталь. Эти методы обладают высоким быстродействием. К недостаткам метода характерных точек относится тот факт, что он применим только для распознавания заранее определенных деталей. Изменение набора обрабатываемых деталей приводит к необходимости заново проектировать размещение датчиков. В этом случае теряется основное преимущество универсальных роботов — быстрота переналадки под выполняемую новую операцию. К тому же этот метод не позволяет найти деталь в произвольном месте рабочего пространства и не дает информацию об объектах во внешней среде робота.

В настоящее время для решения сложных задач классификации широко используется метод

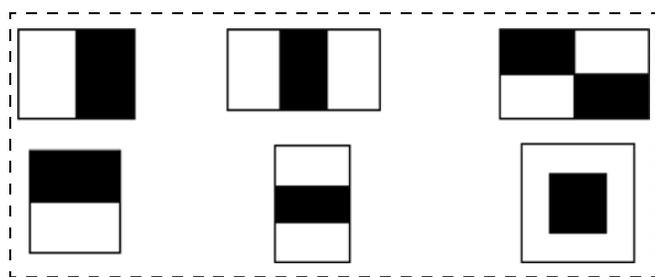


Рис. 1. Признаки Хаара

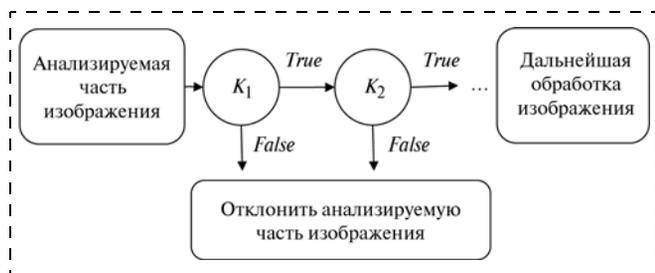


Рис. 2. Каскадный классификатор

Виолы—Джонса [4]. По приведенной классификации метод относится к интегральным методам, тем не менее, он показал высокую эффективность при решении ряда сложных задач, таких как локализация лица на фотографиях или выделение заданных объектов на снимках. Метод Виолы—Джонса основан на использовании признаков Хаара. Признаки Хаара представляют собой двоичную аппроксимацию вейвлета Хаара. На рис. 1 приведен набор признаков Хаара, позволяющих находить края, центр и линии на изображении.

Для каждого признака Хаара вычисляется численное значение по формуле [4]

$$f = \sum_{S_1} I - \sum_{S_2} I,$$

где I — интенсивность пикселей; S_1 — множество пикселей в области черного прямоугольника; S_2 — множество пикселей в области белого прямоугольника.

Полученные численные значения используются в классификаторе:

$$h_i(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i f_i(x) < p_i Q_i; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $h_i(x)$ — значение i -го классификатора; p_i — направление знака неравенства ($p_i \in \{+1, -1\}$); $f_i(x)$ — значение i -го признака Хаара; Q_i — пороговое значение для i -го признака Хаара; x — субокно, взятое на исходном изображении.

Для сокращения вычислительных затрат при расчете значений признаков Хаара используется интегральное представление изображения. Интегральное представление изображения — это двумерный массив, размер которого совпадает с размером исходного изображения, в ячейках которого хранится сумма пикселей выше и левее текущего, включая текущий. Вычисление интегрального представления изображения выполняется по формулам

$$I_{i,j} = p_{i,j} + I_{i,j-1} + I_{i-1,j} - I_{i-1,j-1};$$

$$I_{0,j} = 0, I_{i,0} = 0, I_{0,0} = 0,$$

где $p_{i,j}$ — яркость пикселя исходного изображения; $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$.

Использование интегрального представления позволяет получить алгоритм вычисления значений сумм пикселей в заданной прямоугольной области с постоянной вычислительной сложностью.

Выделение объекта в методе Виолы—Джонса выполняется с помощью классификатора. Для сокращения времени, затрачиваемого на обработку каждого окна, и увеличения эффективности обнаружения классификатор строят по каскадному типу (рис. 2).

Анализируемое изображение передается на следующий классификатор каскада только в том случае, если оно успешно прошло текущий классификатор. Если классификатор выдал значение *False*, то дальнейшая обработка анализируемого изображения уже не выполняется. Это позволяет сократить вычислительные затраты на обработку изображения.

Каскад классификатора — это линейная комбинация простейших классификаторов:

$$H = \sum_{i=1}^n a_i h_i,$$

где n — число классификаторов; a_i — весовой коэффициент i -го классификатора; h_i — значение i -го классификатора.

На качество работы каскада классификатора распознавания существенно влияет правильность настройка классификатора, а также набор используемых примитивов Хаара. Настройка классификатора, т. е. подборка значений констант a_i , выполняется на этапе обучения с помощью алгоритма, который называется AdaBoost [5, 6]. Алгоритм AdaBoost (Adaptive Boosting — адаптивное улучшение) показал свою эффективность при построении классификатора для решения таких сложных задач, как распознавание лиц на изображении.

Описание алгоритма AdaBoost приведено ниже.

Входные данные: обучающая выборка — $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$, где $x_i \in X, y_i \in Y = \{-1, +1\}, i = 1, 2, \dots, N$; множество простых классификаторов h_m .

Выходные данные: веса a_m , с которыми простые классификаторы h_m входят в результирующий классификатор H .

1. Инициализация начального распределения

$$D_1(i) = 1/N, \text{ где } i = 1, 2, \dots, N.$$

2. Для каждого $m = 1, 2, \dots, M$ выполнить:

2.1) находим классификатор, который имеет минимальную взвешенную ошибку классификации:

$$h_m = \arg \min_{h_j} \left(e_j = \sum_{i=1}^n D_m(i) \cdot [h_j(x_i) \neq y_i] \right);$$

2.2) вычисляем коэффициент a_m , который является вкладом текущего слагаемого в классифицирующую функцию

$$a_m = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 - e_m}{e_m} \right);$$

2.3) обновляем распределение

$$D_{m+1}(i) = \frac{D_m(i)}{Z_i} \cdot \begin{cases} e^{-a_m}, & \text{если } h_m(x_i) = y_i; \\ e^{a_m}, & \text{если } h_m(x_i) \neq y_i, \end{cases}$$

где Z_i — нормализующий коэффициент, такой что

$$\sum_{i=1}^N D_{m+1}(i) = 1.$$

Коэффициент распределения увеличивается, если h_m допускает на нем ошибку, и уменьшается, когда h_m правильно классифицирует x_i .

3. Составляем результирующий классификатор

$$H(x) = \text{sign} \left[\sum_{m=1}^M a_m h_m(x) \right].$$

Объекты, используемые в машиностроении, как правило, имеют строгие геометрические контуры. Во внешней среде робота объекты могут находиться в произвольной ориентации (на плоскости). Для более надежного распознавания предлагается расширить набор примитивов (см. рис. 1) и включить примитивы, повернутые на 45° (рис. 3). Кроме того, при распознавании объектов не требуется анализировать изменения в текстуре. Это позволяет сократить число примитивов, используемых при работе каскадного классификатора и, тем самым, сократить время, затрачиваемое на обработку изображения внешней среды робота.

Объекты, обнаруженные во внешней среде робота и не распознанные как искомые объекты, заносятся в класс препятствий. Их пространственное расположение учитывается алгоритмом построения плана траектории.

Пример использования метода Виолы—Джонса. Для оценки эффективности рассмотренного метода выбирали изображения, на которых объекты имели большие тени, что затрудняло процедуру распознавания и классификации объектов (рис. 4).

Использование метода Виолы—Джонса позволило выделить области, содержащие детали, определить их центры. На рис. 5 показаны контуры выделенных объектов. Кроме выделения на изображении, получаем численные значения для габаритных размеров объектов и их центров (рис. 6).

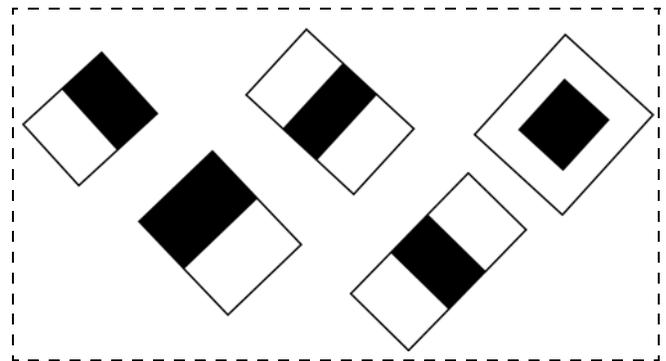


Рис. 3. Дополнительные признаки Хаара

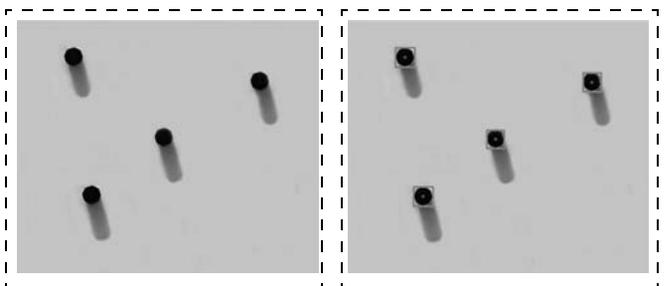


Рис. 4. Изображение внешней среды робота

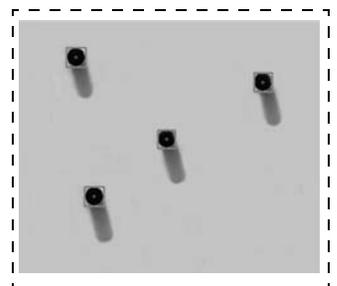


Рис. 5. Результат обработки изображения внешней среды

```

D:\ArmRobot-243\ArmRobot-Test.exe
[1] image: 063.bmp
[1] width: 640 pixels
[1] height: 480 pixels
[1] image size: 221600 bytes
[1] width step: 1920 bytes
[1] Centre (x, y): 380,00 139,50 (mm.) Radius (x, y): 7,50 7,50 (mm.)
[1] perim: 98,91
[1] Centre (x, y): 322,00 94,00 (mm.) Radius (x, y): 7,00 7,00 (mm.)
[1] perim: 92,08
[1] Centre (x, y): 245,00 49,00 (mm.) Radius (x, y): 7,00 7,50 (mm.)
[1] perim: 94,67
[1] Centre (x, y): 394,50 29,00 (mm.) Radius (x, y): 7,50 7,50 (mm.)
[1] perim: 98,91

```

Рис. 6. Результат работы программы распознавания

Полученные основные геометрические характеристики объектов внешней среды позволяют построить топологию внешней среды и использовать ее в задачах управления роботом.

Планирование траектории робота

Одной из ключевых задач робототехники является задача планирования перемещения рабочего органа исполнительного механизма в произвольных внешних средах. Несмотря на большое число работ, посвященных этой задаче ([7–10] и т. д.), она остается актуальной и в настоящее время.

Задача планирования заключается в том, что необходимо рассчитать перемещение исполнительного звена робота из начального состояния в целевое. Наличие препятствий во внешней среде значительно усложняет решение этой задачи. Конечной целью задачи планирования (траектории перемещения исполнительного звена робота) является построение функций управления приводами робота, совместное управление которыми обеспечит безопасное и безаварийное функционирование робота во внешней среде с препятствиями. Особенностью решения задачи планирования в этом случае является необходимость контроля за соударением звеньев робота между собой и за столкновением с объектами внешней среды. Для этого необходимо рассчитывать пространственное расположение звеньев робота (манипулятора) при заданных значениях относительного смещения звеньев и проводить контроль на геометрическое противоречие.

Основой для решения этой задачи является алгоритм перебора в пространстве состояний и эвристические оценочные функции вида [11, 12]

$$f(n) = g(n) + h(n).$$

Здесь $g(n)$ — оценка затрат на переход из начального состояния в n -е состояние; $h(n)$ — оценка затрат на переход из n -го состояния в целевое.

Применительно к задаче планирования оценочная функция будет иметь вид [13, 14]

$$f(n) = A(n-1) + \sum_{k=1}^m d_k(n)F_k + R_1(n)F_{\min} + \delta(n), (1)$$

где $A(n-1)$ — работа, выполняемая при переходе

из начального состояния в $(n-1)$ -е; $\sum_{k=1}^m d_k(n)F_k$ —

работа, выполняемая при переходе из $(n-1)$ -го в n -е состояние; $d_k(n)$ — перемещение, выполненное k -м приводом при переходе из $(n-1)$ -го в n -е состояние; m — число приводов исполнительного механизма робота; F_k — сила k -го привода, затрачиваемая на единицу перемещения; $R_1(n)$ — расстояние от исполнительного звена робота, находящегося в n -м состоянии, до целевой точки по прямой; F_{\min} — минимальная сила, развиваемая приводами робота на единицу измерения; $\delta(n) = \infty$, если n -е состояние является запрещенным, и $\delta(n) = 0$ в противном случае. Под запрещенным понимается состояние, недопустимое с точки зрения геометрических и физических ограничений.

Наличие кинематической избыточности в кинематике робота позволяет управлять роботом так, чтобы обеспечить минимизацию энергетических затрат робота или времени выполнения операции и т. д. Оценочная функция (1) обеспечивает построение оптимальной траектории в смысле энергетических затрат. Для построения оптимальной по времени траектории перемещения исполнительного звена робота можно использовать оценочную функцию

$$f(n) = T(n) + R_1(n)/V_{\min} + \delta(n),$$

где $T(n)$ — время, затрачиваемое при переходе из начального состояния в n -е; $R_1(n)$ — расстояние от исполнительного звена робота до целевой точки из n -го состояния по прямой; V_{\min} — минимальная скорость линейного перемещения, допустимая в кинематических узлах робота; $\delta(n) = \infty$, если n -е состояние является запрещенным, и $\delta(n) = 0$ в противном случае.

В результате выполнения алгоритма будет получена таблица дискретных значений обобщенных переменных. Аппроксимация табличных данных позволяет получить функции управления приводами робота, которые обеспечат безопасное и безаварийное перемещение исполнительного звена робота из начального состояния в целевое.

Заключение

Применение метода Виолы—Джонса в робототехнике обеспечивает комплексное решение задачи распознавания, а именно, позволяет выполнять классификацию объектов, находящихся во внешней среде робота, и определять геометрические характеристики объектов внешней среды с точностью, обеспечиваемой ПЗС-матрицей видеокамеры.

Применение алгоритмов планирования, учитывающих препятствия, находящиеся во внешней среде, позволяет построить траекторию перемещения, безопасную как для робота, так и для других объектов внешней среды, т. е. исключить соударе-

ние звеньев робота как между собой, так и с объектами внешней среды.

Таким образом, рассмотренные алгоритмы позволяют эффективно решить задачу адаптивного управления роботом в сложной среде с априори неполной информацией о внешней среде.

Список литературы

1. Клевалин В. А., Поливанов А. Ю. Системы технического зрения в промышленной робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 9. С. 26—36.
2. Клевалин В. А., Поливанов А. Ю. Цифровые методы распознавания в системах технического зрения промышленных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. 2008. № 5. С. 20—23.
3. Корендяев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И. Теоретические основы робототехники. Т. 2. М.: Наука, 2006.
4. Viola P., Jones M. J. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Kanai, Hawaii, USA, 2001. V. 1. P. 511—518.
5. Viola P., Jones M. J. Robust real-time face detection // International Journal of Computer Vision. 2004. V. 57. № 2. P. 137—157.
6. Freund Y., Schapire R. E. A short introduction to boosting // Journal of Japanese Society for Artificial Intelligence. September, 1999. 14 (5). P. 771—780.

7. Schapire R. E. A brief introduction to boosting // Proc. of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1999.

8. Кобринский А. А., Кобринский А. Е. К построению движений манипуляционных систем. Доклады АН СССР, 1975, 224, № 6. С. 1030—1033.

9. Верещагин А. Ф., Генерозов В. Л. Планирование траектории исполнительного органа манипуляционного робота // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1978. № 2. С. 76—87.

10. Аксенов Г. С., Воронцов Д. К., Фомин В. Н. Построение программных движений манипулятора при помощи ЭВМ // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1978. № 4. С. 50—55.

11. Малышев В. А., Тимофеев А. В. Алгоритмы построения программных движений манипуляторов с учетом конструктивных ограничений и препятствий // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1978. № 6. С. 64—72.

12. Нильсон Н. Искусственный интеллект. Методы поиска решения. М.: Мир, 1973. 270 с.

13. Змитрович А. И. Интеллектуальные информационные системы. Мн.: НТООО "ТетраСистем", 1997. 368 с.

14. Горитов А. Н. Построение плана траектории промышленного робота в произвольных рабочих средах // Автоматизация и современные технологии. 2001. № 7. С. 18—23.

15. Горитов А. Н. Повышение эффективности алгоритма построения плана траектории промышленного робота в произвольных рабочих средах // Автоматизация и современные технологии. 2004. № 8. С. 3—7.

УДК 69.002.5

В. В. Абрамов, д-р техн. наук, проф., valabramov@rambler.ru,

Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",

В. М. Иванюгин, канд. техн. наук, доц., ivanyugin@mirea.ru,

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики,

С. В. Петухов, канд. техн. наук, доц., svptu@mail.ru,

Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства

Система технического зрения для роботизации отделки (шпаклевки) железобетонных изделий

Предлагается высокоточная технология для отделки железобетонных изделий на конвейере. Робототехнический комплекс включает отделочную машину и систему технического зрения, которая позволяет адаптировать комплекс к внешнему окружению и идентифицирует край панели для точного позиционирования рабочего органа. Работа комплекса контролируется программным обеспечением, которое минимизирует обработку и расход энергии для строительных изделий определенного типа и размера. Система технического зрения позволяет обрабатывать изображения в реальном времени.

Ключевые слова: система технического зрения, робототехнический комплекс, шпаклевочная машина

V. V. Abramov, V. M. Ivanyugin, S. V. Petukhov

Computer Vision System for Robotics Finishes (Shpackling) Ferroconcrete Items

Higher-priority technology for finishing on ferroconcrete items conveyor line presented. The technical robot complex include finishing (shpackling) machine and computer vision system (CVS). The CVS allow adapting to external environment change, to identify panel edge for placement of work member to an initial position. The complex is controlled by the software, which minimize route length and power inputs for specific type and size of building elements. The CVS demonstrates its capacity for real-time image processing.

Keywords: computer vision system, technical robot complex, shpackling machine

Робототехнический комплекс для шпаклевочных работ

Повышение производительности технологических процессов в производстве строительных материалов и изделий является важной проблемой. Особенно актуальным является устранение ручного труда при отделочных работах, упрощение обслуживания отделочных машин и автоматизация их работы [1].

При изготовлении железобетонных изделий по кассетной технологии и вибропркатным методом их поверхности имеют низкое качество. Для устранения дефектов необходимо шпаклевание поверхности изделий на заводах механизированным способом. Существующие способы отделки свежееотформованных панелей отличаются большой трудоемкостью при их ручном и даже механизированном исполнении (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Поэтому разработка робототехнического комплекса для шпаклевочных работ является весьма актуальной.

Результатом стал проект отделочной машины, которая позволяет снизить число рабочих на посту отделки железобетонных панелей, снизить технологические потери отделочных материалов, повысить производительность и производить продукцию высокого качества. Дальнейшая модернизация шпаклевочной машины для отделки внутренних стеновых панелей предполагает использование системы технического зрения (СТЗ) для позиционирования обрабатываемого изделия [2].

Разработанный робототехнический комплекс (РТК) для шпаклевания панелей на вертикальном отделочном конвейере представлен на рис. 2. Основными узлами РТК являются: рама 1, каретка 2, привод горизонтального перемещения 3, привод

прижатия 4 дискового рабочего органа 5, установленного в направляющих каретки, привод вертикального перемещения 6, аппарат для подачи шпаклевки 7, блок управления 8. Механизмы и узлы, смонтированные на раме 1, перемещаются вдоль панели 9 с помощью роликов по верхней балке 10 и нижней направляющей 11.

Подача отделочного состава к рабочему органу осуществляется по гибкому рукаву (на рис. 2 не показано) от аппарата 7, который смонтирован на посту отделки. Блок управления 8 расположен вблизи левого края панели, на нем смонтирована телевизионная камера 12, являющаяся элементом СТЗ. Устройство считывания штрих-кода 13 позволяет распознать типоразмер изделия по маркеру 14.

Наиболее востребован РТК для шпаклевочных работ на вертикальных отделочных конвейерах, они широко распространены на заводах ЖБИ. В основном на таких конвейерах выполняют отделку панелей перекрытий, панелей внутренних стен и панелей наружных стен. Особенностью этих конвейеров является тот факт, что на них обрабатывается широкая номенклатура изделий, а установка изделия на конвейер выполняется мостовым краном с большой погрешностью, которая составляет десятки сантиметров. В таком случае обработка изделия по жесткой программе, задающей траекторию движения рабочего органа, становится невозможной, поскольку координаты края панели относительно поста отделки будут различными у каждой панели.

Ввиду различий типоразмеров панелей рабочий орган перемещается по "своей" заранее рассчитанной траектории для каждой панели (как для станка с ЧПУ). Поэтому отделочная машина с тремя степенями подвижности рабочего органа, имеющая СТЗ и числовое программное управление, представляет собой мехатронный РТК.

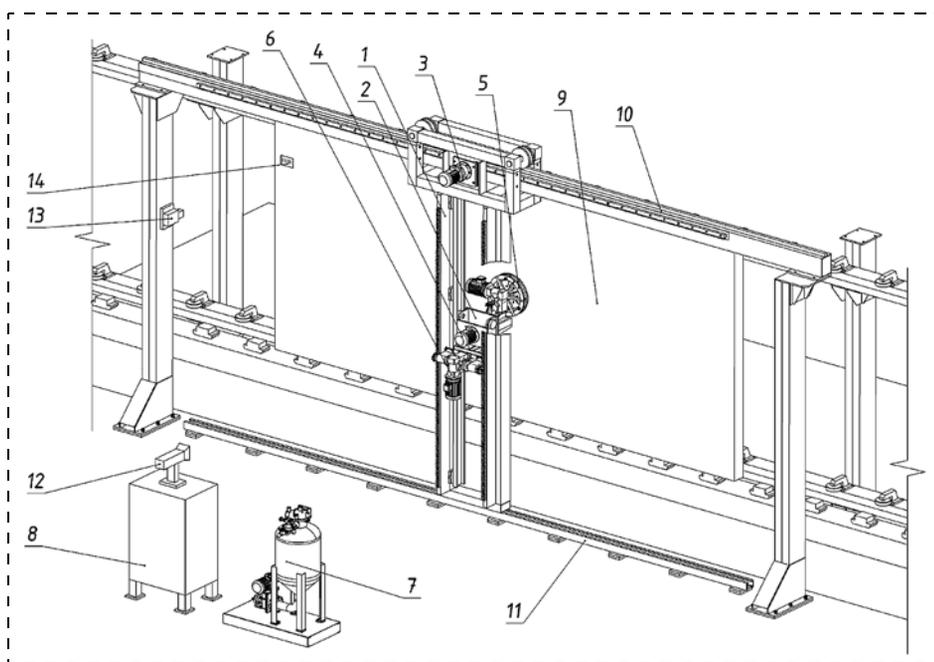


Рис. 2. Робототехнический комплекс для шпаклевания панелей на вертикальном отделочном конвейере

Назначение систем технического зрения

Использование технического зрения на основе твердотельных камер или лазерного дальномера и других методов оучувствления диктуется необходимостью повышения гибкости и расширения области применения робототехнических систем в стройиндустрии. Хотя датчики расстояния, силы и тактильные датчики играют большую роль, именно телевизионные СТЗ являются наиболее полным источником информации для позиционирования и управления движением рабочего органа роботов.

Зрение робота можно определить как процесс выделения, идентификации и преобразования информации, полученной из наблюдаемых трехмерных сцен. Этот процесс, называемый также техническим или машинным зрением, разделяется на несколько основных этапов [3—6]: получение информации (видео- или фотоизображений), предварительная обработка информации, сегментация, описание, распознавание, интерпретация. Приведенную классификацию можно рассматривать как практический метод реализации СТЗ различного назначения.

Таким образом, установив СТЗ на РТК для безотходной шпаклевки железобетонных изделий, можно исключить человека из производства бетонных плит на данном этапе. Главная цель создания СТЗ на данный момент — калибровка рабочего органа робота-шпаклевщика относительно обрабатываемого им изделия. Для этого нужно решить несколько взаимосвязанных задач в соответствии с вышеприведенными этапами.

Постановка задачи о выделении границ

Визуальная информация преобразуется в электрические сигналы с помощью видеодатчиков. После пространственной дискретизации и квантования по амплитуде эти сигналы дают цифровое изображение. В разрабатываемой СТЗ в качестве датчика используется веб-камера. Современная веб-камера представляет собой цифровое устройство, осуществляющее видеосъемку, преобразование аналогового видеосигнала в цифровой, сжатие цифрового видеосигнала и передачу видеоизображения по компьютерной сети.

Первой и одной из основных задач в создании СТЗ для робота-шпаклевщика является разработка приложения, которое могло бы получать изобра-

жение плиты, обрабатывать его и в итоге вычислять местоположение края плиты. В качестве примера было получено тестовое изображение реального края плиты (рис. 3). Данный край необходимо зафиксировать и получить его координаты либо расстояние от границы снимка.

Выделение границ — термин в теории обработки изображения и компьютерного зрения, частично из области поиска и распознавания объектов на изображении. Эта процедура основывается на алгоритмах определения точек цифрового изображения, в которых резко изменяется яркость или имеются другие виды неоднородностей. Они могут отражать различные предположения о модели формирования изображения, изменения в яркости изображения могут указывать на изменения глубины, ориентации поверхностей, свойств материала и различие в освещении наблюдаемой сцены.

Линейные цифровые фильтры

Под фильтрацией цифровых изображений понимают операцию, имеющую своим результатом изображение того же размера, полученное из исходного по некоторым правилам. В результате работы фильтров интенсивность (цвет) каждого пикселя результирующего изображения определяется как функция интенсивностей (цветов) пикселей, расположенных в некоторой его окрестности в исходном изображении.

Правила, задающие фильтрацию (их называют фильтрами), могут быть самыми разнообразными [6—10]. Заметим, что операция, заключающаяся в последовательном применении двух или более фильтров, тоже является фильтрацией. Фильтрация изображений является одной из самых фундаментальных операций компьютерного зрения. Фактически, с той или иной фильтрации исходных изображений начинается работа подавляющего большинства методов.

Будем считать, что задано исходное полутоновое изображение A , и обозначим интенсивности его пикселей $A(x, y)$. Линейный фильтр определяется функцией F , заданной на растре. Данная функция называется ядром фильтра, а сама фильтрация выполняется с помощью операции дискретной свертки (взвешенного суммирования):

$$B(x, y) = \sum_i \sum_j F(i, j) A(x + i, y + j).$$

Результатом служит изображение B . Обычно ядро фильтра отлично от нуля только в некоторой окрестности N -й точки $(0, 0)$. За пределами этой окрестности $F(i, j)$ или в точности равно нулю, или очень близко к нему, так что можно им пренебречь. Суммирование проводится по (i, j) , и значение каждого пикселя $B(x, y)$ определяется пикселями изображения A , которые лежат в окне N , центрированном в точке (x, y) .

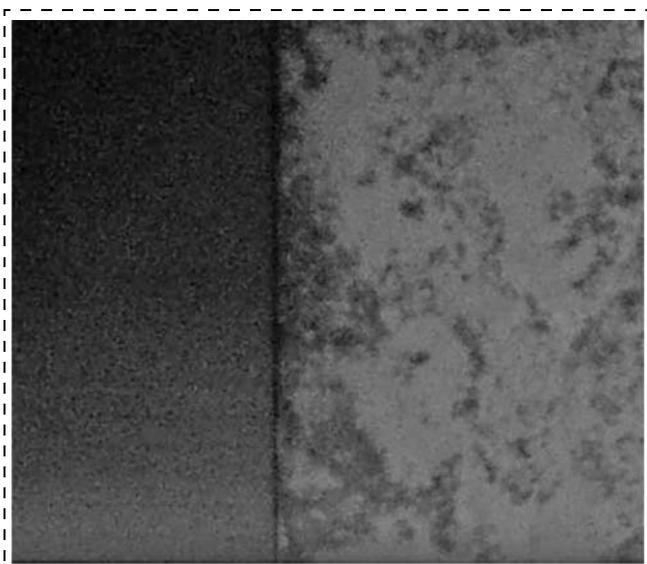


Рис. 3. Изображение края плиты

Фактически в качестве фильтра выступает матрица (ядро), свертка изображения с которой дает новое изображение. В качестве ядра обычно используется матрица размером 3×3 , но возможно и больше (5×5 , 7×7 и т. д.). Ядро содержит степени влияния ("веса") окружающих значений элемента на сам элемент. Получается, что каждый элемент исходной матрицы умножается на центральное значение матрицы ядра. Кроме этого, на соответствующие значения умножаются окружающие его элементы, после чего результаты суммируются и принимаются как преобразованное значение.

Лапласиан

В двумерном случае аналогом второй производной является скалярный оператор, называемый оператором Лапласа (лапласиан):

$$\nabla^2 f = \Delta f = \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right).$$

Оператор Лапласа можно приблизить для дискретных изображений фильтром с матрицей, один из вариантов которой имеет вид

$$M_{\Delta} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

В результате применения дискретного лапласиана большие по модулю значения соответствуют как вертикальным, так и горизонтальным перепадам яркости. Лапласиан является, таким образом, фильтром, находящим границы любой ориентации. Нахождение границ на изображении может проводиться путем применения этого фильтра и сохранения всех пикселей, модуль значения которых превосходит некоторый порог. Однако такой алгоритм имеет существенные недостатки — неопределенность в выборе значения порога и чувствительность к шумам изображения.

Оператор Собеля

Это дискретный дифференциальный оператор, вычисляющий приближенное значение градиента яркости изображения. Оператор Собеля основан на свертке изображения небольшими целочисленными фильтрами в вертикальном и горизонтальном направлениях, поэтому его легко вычислять. Вместе с тем, используемая им аппроксимация градиента достаточно грубая, особенно это сказывается на высокочастотных колебаниях изображения.

Математически градиент функции двух переменных для каждой точки изображения (которой и

является функция яркости) — это двумерный вектор, компонентами которого являются производные яркости изображения по горизонтали и вертикали. Градиент изображения $f(x, y)$ в точке (x, y) определяется как двумерный вектор

$$G[f(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}.$$

Вектор G указывает направление максимального изменения функции f в точке (x, y) . При определении краев представляет интерес модуль этого вектора. На практике, как правило, градиент аппроксимируется абсолютными значениями

$$G[f(x, y)] \cong |G_x| + |G_y|.$$

В каждой точке изображения градиентный вектор ориентирован в направлении наибольшего увеличения яркости, а его длина соответствует изменению яркости. Это означает, что результатом оператора Собеля в точке области постоянной яркости будет нулевой вектор, а в точке, лежащей на границе областей различной яркости, — вектор, пересекающий границу в направлении увеличения яркости.

Ядро оператора:

$$G_x^{sobel} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad G_y = G_x^T.$$

Сглаживающие фильтры

Чтобы отделить перепады яркости границ от перепадов яркости, вызванных шумами и несущественными деталями, изображение подвергают сглаживающей гауссовской фильтрации.

Такое решение проблемы, на первый взгляд, парадоксально — для нахождения границ мы их сначала размываем. Данный прием основывается на том, что при сглаживающей фильтрации мелкие несущественные детали будут размываться существенно быстрее перепадов между областями. Ядро гауссовского фильтра:

$$F_g(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\pi\sigma^2}\right).$$

Гауссовский фильтр имеет ненулевое ядро бесконечного размера. Однако ядро фильтра очень быстро убывает к нулю при удалении от точки $(0, 0)$, и поэтому на практике можно ограничиться сверткой с окном небольшого размера (матрица 3×3 , 5×5).

Пример матрицы, реализующей сглаживающий фильтр:

$$\begin{pmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{pmatrix}.$$

Алгоритм Кэнни

Алгоритм Кэнни состоит в совмещении оператора выделения края (контур) и применения гистерезисной фильтрации. Идея гистерезисной фильтрации заключается в том, что длинный устойчивый граничный контур, скорее всего, содержит в себе пиксели с особенно большим перепадом яркости, и, начиная с такого пикселя, контур можно проследить, переходя по граничным пикселям с меньшим перепадом яркости (рис. 3).

Реализация решения задачи

Для решения задачи с использованием описанных выше методов было создано программное обеспечение, которое реализует возможность захвата изображения, его последующую обработку, выделяет границы в изображении и находит среди них нужную.

Для ускорения процесса создания программы были использованы возможности библиотеки машинного зрения с открытым исходным кодом OpenCV. Библиотека написана на C и C++ и работает под Linux, Windows и Mac OS X. OpenCV была разработана для эффективных вычислений и с упором на приложения реального времени с использованием преимуществ многоядерных процессоров [10–13].

Главной целью OpenCV является предоставление простой в использовании инфраструктуры компьютерного зрения, которая помогает быстро строить достаточно сложные приложения. OpenCV содержит более 500 функций, которые охватывают многие области, в том числе мониторинг конвейерной продукции, медицинскую визуализацию, безопасность, пользовательские интерфейсы, калибровку камер, стереозрение и робототехнику. OpenCV также содержит комплексную библиотеку машинного обучения общего назначения Machine Learning Library (MLL). Эта подсистема ориентирована на статистическое распознавание образов и кластеризацию. Библиотека MLL весьма полезна для задач машинного зрения, но при этом носит достаточно общий характер и может использоваться для любых задач машинного обучения.

В программе выделения границы были использованы два модуля OpenCV:

- CV — модуль обработки изображений и компьютерного зрения;

- Highgui — модуль для ввода/вывода фотоизображений и видеоизображений.

При использовании всего двух модулей библиотеки OpenCV для разработчиков открывается широкий спектр возможностей по созданию сложных приложений.

Поиск линий с помощью преобразования Хо (Hough)

Одним из эффективных методов обнаружения контурных объектов известной формы и оценивания их параметров является преобразование Хо, разработанное для обнаружения прямых линий, а затем кривых заданной аналитической формы (окружностей, парабол, эллипсов и т. п.) на множестве точек двумерной плоскости. Полученное с его помощью описание линий можно использовать для многих приложений машинного зрения, таких как распознавание формы объектов, регистрация изображений и др. [14].

Преобразование Хо позволяет связать сигнальную область (исходное изображение) и область параметров. Этот процесс можно реализовать, если использовать массив аккумуляторов, представляющий двумерное параметрическое пространство R^2 .

Алгоритм программы

1. Получение (захват) изображения с помощью веб-камеры.
2. Вычисление яркости полученного изображения.
3. Применение сглаживающего гауссовского фильтра от помех.
4. Выделение границ в изображении с помощью алгоритма Кэнни.
5. Поиск линий в изображении с помощью алгоритма Хо.
6. Выделение линий с заданным отклонением.

В случае, если обнаруженных линий больше одной, высчитывается математическое ожидание x координаты линии, и выбирается линия, которая находится наиболее близко к нему.

Основные функции и возможности программы

- Использование в качестве исходных данных цифровой видеoinформации различных форматов.
- Использование в качестве исходных данных видеоданных в реальном времени, полученных с веб-камеры.
- Возможность регулировки параметров обработки фото- и видеоизображений.
- Обработка данных и отображение полученных результатов с минимальной задержкой.
- Простой переход между исходным фотоизображением/видеоизображением и результатом обработки (клавиша "Enter").
- Отображение расстояния от левого края кадра до границы.
- Автоматическое сохранение параметров программы при выходе.

Интерфейс программы

Интерфейс программы позволяет задавать некоторые параметры и режим работы программы.

- **Параметры *Sanny1* и *Sanny2*.** Меньший из параметров соответствует минимальной длине градиента, при которой пиксель может быть признан граничным; больший соответствует минимальной длине градиента, при которой пиксель может инициализировать контур.
- **Параметр *Hough*.** Является порогом принятия какого-либо объекта в изображении за линию.
- **Параметр *Angle*.** Максимальное отклонение линии от вертикали.

При нажатии клавиши "Enter" в поле результата исходное изображение меняется на обработанное и наоборот. Найденная граница и расстояние до нее от левого края отображается в обоих вариантах представления результата. При воспроизведении видеоданных или захвате видеоданных с камеры можно "заморозить" текущий кадр с помощью нажатия клавиши "Space" ("Пробел"). Выход из программы осуществляется по нажатию клавиши "Esc". При выходе автоматически сохраняются все настройки параметров программы.

Режимы работы программного комплекса

Разработанный программный комплекс имеет три основных режима работы:

1. Исходными данными являются потоки видеоинформации, получаемой от веб-камеры в реальном времени.
2. Исходными данными являются цифровые изображения
3. Исходными данными являются заранее полученные цифровые видеозаписи.

Первый режим работы назначен по умолчанию. При запуске приложения автоматически запускается режим работы с веб-камерой и начинается обработка получаемой информации в реальном времени.

Второй и третий режимы работы запускаются автоматически при работе в стандартном проводнике Windows с файлами изображения подходящего формата и приложения.

Третий режим работы запускается аналогично второму. Необходимо в стандартном проводнике Windows перетащить файл с видеозаписью на файл, запускающий приложение.

Пример работы программы

Вертикальная линия найдена на расстоянии в 278 пикселей от левого края (рис. 4, см. вторую сторону обложки). Слева показано исходное изображение с наложенной поверх найденной линией, справа — обработанное изображение, по которому выполнялся окончательный поиск линии. На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) показан еще один пример работы программы. В результате обработки изображения железобетонной плиты вертикальная линия (край плиты) найдена на расстоянии 195 пикселей от левого края.

Заключение

Разработан автоматизированный РТК с адаптивной интеллектуальной системой управления. Для его реализации предполагается использовать веб-камеру, подключенную к персональному компьютеру, а также специально разработанное для решения задачи программное обеспечение. Таким образом, РТК для шпаклевки железобетонных изделий, оснащенный СТЗ, позволяет исключить человека из производства бетонных плит на данном этапе.

Список литературы

1. **Абрамов В. В., Петухов С. В., Васильев В. Г., Шпынев Н. А.** О комплексном подходе к автоматизации и роботизации технологических операций в производстве железобетонных изделий // Сб. трудов БГСТУ. 2009. С. 12—20.
2. **Шпынев Н. А., Абрамов В. В., Иванюгин В. М., Петухов С. В.** Роботизация отделочных работ изделий панельного домостроения // Архитектура и строительство. 2011. № 4. С. 95—102.
3. **Фу К., Гонсалес Р., Ли К.** Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.
4. **Петухов С. В., Шаманов И. В.** Методы обработки изображений в многоканальной стереосистеме технического зрения // Динамика неоднородных систем. Тр. ИСА РАН. 2007. Т. 31 (3). С. 243—248.
5. **Петухов С. В.** Адаптивные стереотелевизионные системы технического зрения // Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 3. С. 30—41.
6. **Розенфельд А.** Распознавание и обработка изображений. М.: Мир, 1972. 230 с.
7. **Прэтт У.** Цифровая обработка изображений. Кн. 2. М.: Мир, 1982. 480 с.
8. **Павлидис Т.** Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. М.: Радио и связь, 1986. 400 с.
9. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006.
10. **URL:** <http://www.intuit.ru/department/graphics/rastrgraph/8/>
11. **URL:** <http://www.intuit.ru/department/graphics/rastrgraph/9/>
12. **URL:** <http://docs.gimp.org/en/plugin-convmatrix.html>
13. **URL:** <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/14.php>
14. **Лабунец В. Г., Чернина С. Д.** Теория и применение преобразования Хо // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 10. С. 25—47.

УДК 531.1

В. Е. Павловский, д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., vlpavl@mail.ru,
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН,

В. Н. Огольцов, руководитель направления перспективных разработок, ЗАО "АМТ-ГРУП",
аспирант, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, vitaly.ogoltsov@me.com,

Н. С. Огольцов, инженер-электроник, ogonick@me.com,
ОАО "МТЗ ТРАНСМАШ",

Микрокомпьютерная система управления нижнего уровня для автомобиля с механической трансмиссией

Рассмотрены реальные прототипы устройств управления, разработанные на основе компьютерной модели-симулятора трансмиссии, а также моделей управляющих устройств и алгоритмов нижнего уровня управления автомобилем. Эксперименты показали адекватность созданных ранее моделей и общей архитектуры системы.

Ключевые слова: автономный автомобиль, система управления нижнего уровня, полуавтоматический контроллер трансмиссии

V. E. Pavlovsky, V. N. Ogoltsov, N. S. Ogoltsov

Microcomputer Low Level Control System for the Car with Mechanical Transmission

In this work we have developed prototypes for low-level control devices based on Simulink models. The whole complex was field tested on a production VAZ-21214 "Niva" car. The conducted experiments have indicated the developed models and overall system architecture as valid.

Keywords: autonomous car, low-level control system, semi-automatic transmission controller

Беспилотный автомобиль

Последние годы во всем мире наблюдается значительный рост числа автомобилей на дорогах и плотности использования площади дорог. В особенности это относится к технологически развитым странам. Например, за последние 15 лет плотность дорожных потоков в Великобритании возросла в среднем на 25 % [2]. При этом темпы роста только увеличиваются: по прогнозам некоторых аналитиков в ближайшие 20 лет рост числа автомобилей на дорогах может достигнуть 50 % [3]. Большую роль в организации транспортных потоков начинает играть человеческий фактор [2–3].

В этих условиях все большую актуальность приобретают проблемы оптимизации и повышения эффективности использования дорог, влекущие за собой задачи частичной или полной автоматизации транспортных средств. Традиционно разрабатываемые для этих задач системы управления можно разбить на два больших класса: системы нижнего уровня (СНУ) (модификации подвергаются отдельные агрегаты автомобиля) и системы верхнего

уровня (СВУ), основная задача которых — частичное или полное исполнение функций водителя. На рис. 1 приведены примеры систем разных классов для беспилотного автомобиля.

Системы управления нижнего уровня можно встретить на любом современном автомобиле. К ним относят, например, круиз-контроль, роботизированную трансмиссию, антиблокировочную тормозную систему, систему противодействия заносу автомобиля. Представители этого класса систем уже давно вышли за рамки исследовательских лабораторий и вошли в повседневную жизнь, имеют высокий ко-



Рис. 1. Пример структуры автономно управляемого автомобиля

эффицент надежности и нередко не заменимы при управлении автомобилем.

Однако класс систем управления верхнего уровня все еще требует значительных исследований. Некоторые из этих систем (например, система автоматической парковки автомобиля) уже встречаются на автомобилях некоторых производителей, другие же (система следования за впередиидущим автомобилем, система автоматического планирования и исполнения маршрута) пока можно увидеть только на специальных испытательных полигонах и выставках.

Несмотря на принципиальную разницу в классах этих систем, они преследуют одни и те же основные цели:

- повышение эффективности использования ресурсов (человеческого времени, загруженности дорог, энергетических ресурсов);
- снижение нагрузки на водителя и перехват части выполняемых им функций;
- повышение безопасности на дорогах и уменьшение числа возникающих аварийных ситуаций и ДТП.

В последнее время ежегодно проводят много исследовательских соревнований среди команд, занимающихся созданием беспилотных автомобилей, что еще раз подчеркивает значимость проблемы. Одними из наиболее известных состязаний в данной области являются DARPA Grand Challenge (управление автомобилем по пересеченной местности, 2004 и 2005 г.) и DARPA Urban Challenge (беспилотный автомобиль для езды в городе, 2007 г.) [4]. Последние три года аналогичные соревнования проводятся и в России [5]. Соответственно, появляются публикации по созданию систем автоматизации для автомобиля [6–8].

Данная статья является продолжением публикации [1] и описывает аппаратно-программный комплекс нижнего уровня системы управления автомобилем, разработанный в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. В работе рассматриваются трансмиссия автомобиля, рулевое управление и тормозная система и создание их роботизированных аналогов.

При создании прототипа роботизированного автомобиля было принято решение использовать серийный автомобиль ВАЗ-21214 "Нива" с бензиновым двигателем типа "моновпрыск" объемом 1,7 л. Автомобиль оснащен пятиступенчатой коробкой переключения передачи и двухступенчатой раздаточной коробкой. Дифференциал при экспериментах заблокирован (данное допущение сделано в целях упрощения динамической модели и схемы управления на ее основе).

Выбор автомобиля с механической коробкой переключения передач (КПП) обусловлен следующими причинами:

- синтезированный алгоритм и устройства управления механической трансмиссией автомобиля предоставляют возможность построения серийного агрегата, относящегося к классу роботизированных КПП;

- существуют определенные сферы применения транспортных средств, где установка автоматических или роботизированных КПП невозможна по тем или иным причинам (сниженная ремонтпригодность, высокие требования к нагрузкам на трансмиссию);
- использование автомобиля с заводской автоматической или роботизированной КПП добавляет лишние временные задержки, ухудшая реакцию всей системы, а также трудно поддается теоретическому анализу ввиду закрытости конкретных алгоритмов, используемых производителями АКПП;
- решение задачи управления автомобилем с механической КПП позволяет создавать специально оборудованные автомобили для управления инвалидами или обучения вождению.

Особенности динамической модели механической трансмиссии автомобиля

В рамках предыдущей работы [1] была разработана компьютерная динамическая модель автомобиля с механической трансмиссией в среде MATLAB\ Simulink, описывающая движение транспортного средства по прямой. Параметры модели (если не указано иное) были заданы на основе технических характеристик ВАЗ-21214 "Нива" [10]. Рассмотрим ключевые компоненты, из которых состоит модель.

Двигатель автомобиля представляет собой модель двигателя внутреннего сгорания, параметризованную по экспериментальным характеристикам двигателя ВАЗ-21213 "Нива" объемом 1,7 л [9], оборудованного контроллером холостого хода.

Привод сцепления состоит из механизма педали (включая возвратные пружины, ограничители хода и демпферы), гидравлического блока передачи усилия и выжимного рычага.

Механизм сцепления моделирует центральную нажимную диафрагменную пружину и дисковое сцепление.

Коробка переключения передач состоит из первичного, промежуточного и вторичного валов и управляется с помощью пяти односторонних синхронизаторов (задняя передача отсутствует). Разработанная модель синхронизатора позволяет учесть временные задержки при выравнивании скоростей вращения валов во время переключения передач, а также ошибки управления (к примеру, биение зубьев между муфтой синхронизатора и зубчатым венцом шестерни передачи при не до конца выжатом сцеплении). На данный момент ведется работа по созданию модели двустороннего синхронизатора, более точно соответствующей устанавливаемым на современные коробки передач.

Тормозная система представляет собой одноконтурный гидравлический привод, состоящий из одного главного и четырех рабочих тормозных цилиндров, соединенных системой трубопроводов.

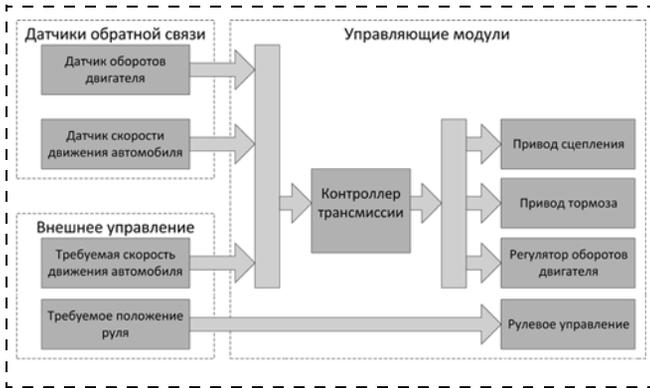


Рис. 2. Логическая схема взаимодействия между подсистемами управления

Корпус и колеса автомобиля описывают модель сцепления с дорогой, работу подвески, аэродинамические характеристики корпуса и влияние внешней среды (скорость ветра, угол наклона к горизонту).

По результатам компьютерного анализа этой модели была построена расширенная Simulink-модель для синтеза устройств и алгоритмов управления, в которую были добавлены модели приводов сцепления и тормоза, регулятора оборотов двигателя и контроллера трансмиссии.

На основе синтезированных алгоритмов были выделены следующие величины, получаемые из обратной связи, необходимые для управления механической трансмиссией автомобиля:

- скорость движения автомобиля;
- положение педалей сцепления и тормоза;
- скорость вращения выходного вала двигателя внутреннего сгорания;
- положение муфт синхронизаторов (в рамках модели в целях упрощения предполагалось управление КПП в виде согласованного вектора усилий на муфты синхронизаторов).

Внешнее управление контроллеру поступает в виде двух значений: требуемой скорости движения автомобиля и ограничения максимально используемой мощности двигателя. Взаимодействие между частями системы (включая датчики обратной связи и управление) описывается в виде логической схемы, изображенной на рис. 2.

Основные структурные компоненты системы управления нижнего уровня

На основе анализа построенной динамической модели и конструкции автомобиля ВАЗ-21214 "Нива" были спроектированы устройства, необходимые для реализации управления автомобилем с помощью синтезированного алгоритма контроллера трансмиссии (см. таблицу). Рассмотрим внутреннее устройство и принцип работы каждого устройства.

Регулятор оборотов двигателя. Во время работы контроллер трансмиссии вычисляет исходя из целевой скорости движения автомобиля и выбран-

Агрегаты системы управления нижнего уровня

Название агрегата	Датчики обратной связи	Управляющее воздействие
Регулятор оборотов двигателя	Датчик положения коленчатого вала двигателя	Положение дроссельной заслонки
Привод сцепления	Датчик положения педали сцепления	Положение педали сцепления
Привод тормоза	Датчик положения педали тормоза; датчик давления в тормозной системе (не реализовано в рамках текущего прототипа)	Положение педали тормоза
Привод рулевого управления	Датчик поворота руля	Поворот руля
Датчик скорости	Датчик скорости	Отсутствует

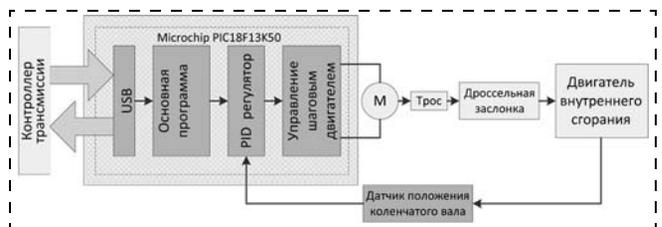


Рис. 3. Логическая схема контроллера регулятора оборотов двигателя

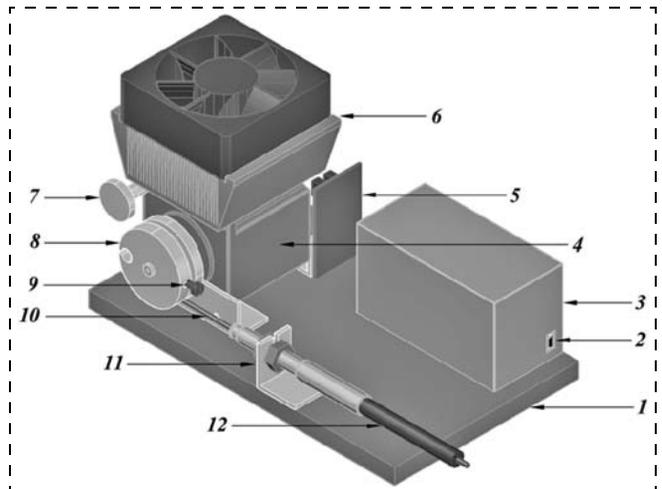


Рис. 4. Изометрическая модель регулятора оборотов двигателя

ной передачи необходимую частоту вращения выходного вала двигателя (в единицах RPM^1), которая передается на вход контроллера регулятора оборотов двигателя (рис. 3). Текущее, вычисленное на основе показания датчика положения коленчатого вала двигателя, и целевое значения оборотов двигателя подаются на вход ПИД регулятора. Выход ПИД регулятора используется для вычисления управления шаговым двигателем, открывающим или закрывающим дроссельную заслонку.

На рис. 4 представлена изометрическая модель регулятора оборотов. На платформе 1 закреплен контроллер 3, подключаемый к основному компь-

¹ RPM = revolutions per minute — число оборотов в минуту.

ютеру через USB-порт 2. Управляемый контроллером шаговый двигатель 4 вращает шкив 8, натягивая или отпуская металлический трос 10, рубашка которого 12 фиксируется на платформе с помощью крепления 11. Вторым концом троса закреплен на дроссельной заслонке, регулирующей поток воздуха, поступающего в камеры сгорания ДВС. При запуске регулятор выставляет двигатель в "нулевое" положение, используя оптронный датчик 5 (в "нулевом" положении трос должен быть натянут, а дроссельная заслонка закрыта). При работе шаговый двигатель выделяет значительное количество тепла, которое отводится с помощью системы охлаждения 6. Элементы механического ограничителя хода 7 и 9 не дают шкиву совершить полный оборот.

При работе регулятор использует стандартный электромагнитный импульсный датчик положения коленчатого вала для вычисления текущей скорости вращения двигателя. Импульсы данного датчика соответствуют "зубьям" или "выемкам" (в зависимости от конструкции) зубчатого шкива привода генератора, установленного на коленчатый вал [11]. Для синхронизации работы топливных форсунок служит двойной зуб, соответствующий верхней мертвой точке положения вала (рис. 5).

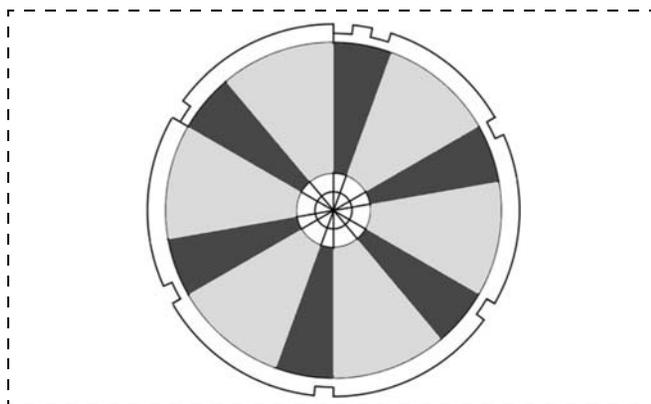


Рис. 5. Схема зубчатого шкива привода генератора

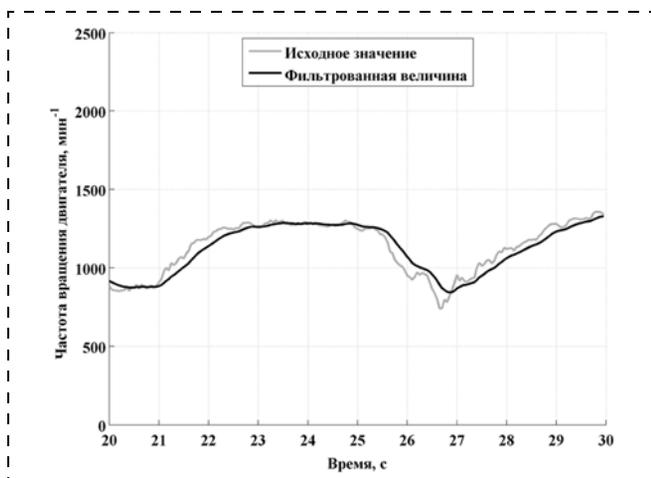


Рис. 6. Фильтрация скорости вращения двигателя, полученной с помощью датчика положения коленчатого вала, $N = 3$

Выход датчика подключается к одному из входов микропроцессора. Для уменьшения влияния помех во время прохождения зубца и обработки двойного зубца как одинарного после каждого получаемого микроконтроллером импульса вводится "слепой" временной промежуток, равный 1/3 времени вращения вала между двумя зубцами, во время которого поступающие с датчика импульсы игнорируются (темно-серая зона на рис. 5). По истечении этого периода обработка импульсов включается заново, а аппаратный таймер, используемый для измерения временных промежутков, обнуляется (светло-серая зона). При этом при получении импульса значение таймера равно 2/3 периода прохождения вала между зубьями.

В используемом для эксперимента ВА3-21214 "Нива" зубчатый шкив имеет шесть зубьев, поэтому частота вращения двигателя равна

$$RPM = 60 \cdot \frac{v}{6 \cdot \frac{3}{2} \cdot n},$$

где n — значение таймера в момент получения импульса; v — частота работы аппаратного таймера в герцах.

Эксперименты показали подверженность полученной величины влиянию периодических помех (обусловлена неточностью изготовления шкива, рис. 6), поэтому она проходит дискретную фильтрацию. Для этого используется простой дискретный алгоритм, описываемый следующими формулами:

$$x'(n) = N(x(n) - \bar{x}(n - 1));$$

$$\bar{x}(n) = \bar{x}(n - 1) + x'(n)(t(n) - t(n - 1)),$$

где $x(n)$ — значение входной функции в момент времени n ; $t(n)$ — время в секундах в момент времени n ; $\bar{x}(n)$ — значение фильтрованной функции; $x'(n)$ — значение первой производной, число N называется коэффициентом фильтрации.

Педаля сцепления. Контроллер трансмиссии отвечает за переключение передач при движении автомобиля. При выходе текущего значения числа оборотов двигателя за пределы диапазона, соответствующего скорости автомобиля и выбранной передаче, требуется переключение передачи "вниз" или "вверх". Данное действие состоит из трех этапов: выжать педаль сцепления, переключить скорость на коробке переключения передач, а затем отпустить сцепление, отслеживая обороты двигателя (при отпуске сцепления нельзя допустить падение оборотов ниже определенного уровня).

Таким образом, контроллер трансмиссии вычисляет требуемое положение педали сцепления исходя из выбранной передачи, текущего положения педали сцепления, частоты вращения коленчатого вала и передает это значение на вход привода сцепления. Целевое и текущее, вычисленное по показаниям координатного счетчика, значения поло-

жения педали сцепления подаются на вход ПИД регулятора. Выходное значение ПИД регулятора используется для управления двигателем (рис. 7).

На рис. 8 представлена изометрическая модель привода сцепления. Контроллер 1 осуществляет управление двигателем постоянного тока 3, используя для обратной связи оптронный координатный счетчик 4. Через ременную передачу 5 крутящий момент двигателя передается на винт 8, по которому вдоль направляющей 6 на роликах 9 передвигается гайка 10. При движении гайка натягивает или отпускает металлический трос 11, рубашка которого 13 закреплена на платформе привода. Калибровка устройства, а именно, определение нулевого положения, происходит с помощью концевой оптронного датчика 2. Демпферные резинки 7 и 12 служат защитой и предотвращают разрушение платформы в аварийных ситуациях. Таким образом, при натяжении трос с помощью закрепленного на полу ролика тянет за педаль сцепления.

Педаль тормоза. Конструкция привода тормоза полностью аналогична приводу сцепления. Однако в дальнейшем ее предполагается усовершенствовать, оснастив датчиком давления жидкости в тормозной системе. Показания датчика можно использовать в качестве обратной связи для построения алгоритма управления педалью тормоза с обратной связью по давлению, а также для обеспечения диагностики неисправностей.

Датчик скорости. В качестве датчика скорости было принято решение использовать встроенный стандартный импульсный датчик, устанавливаемый в раздаточной коробке (используется бортовым контроллером для управления системой впрыска, изменения параметров усилителя руля). Для вычисления скорости движения автомобиля по импульсам с датчика в контроллере используется такой же алгоритм, как и в регуляторе оборотов двигателя для вычисления частоты вращения коленчатого вала двигателя [6].

Рулевое управление. По результатам анализа возможности конструирования и изготовления специализированного привода рулевого управления было принято решение использовать существующие технические средства, а именно серийный электродвигатель руля (ЭУР) совместной разработки ОАО "АвтоВАЗ" и завода "Авиаагрегат" (Махачкала). Данный ЭУР устанавливается на серийный автомобиль ВАЗ-21214 "Нива" без дополнительных доработок и обладает высокими мощностными характеристиками, обеспечивая необходимое усилие на рулевой передаче.

Для управления встроенным в ЭУР электродвигателем штатный контроллер был заменен на контроллер собственной разработки, обеспечивающий подключение и управление через USB.

При движении автомобиля целевое положение руля передается на вход контроллера рулевого управления (рис. 9). Целевое и текущее значения положения руля подаются на вход ПИД регулято-

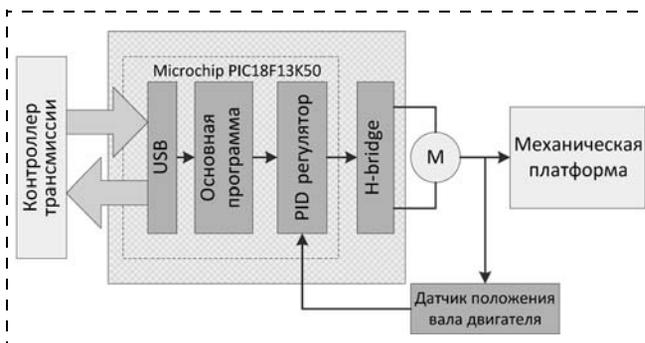


Рис. 7. Логическая схема привода сцепления

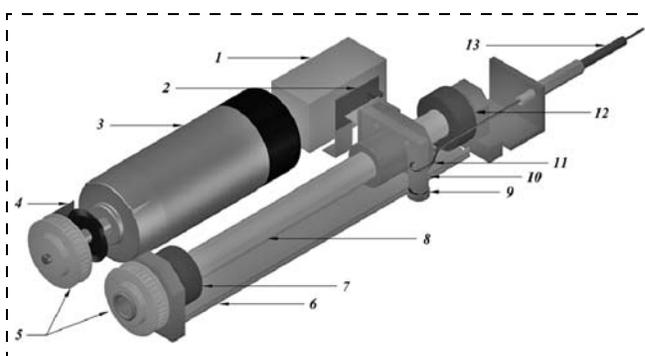


Рис. 8. Изометрическая модель привода сцепления

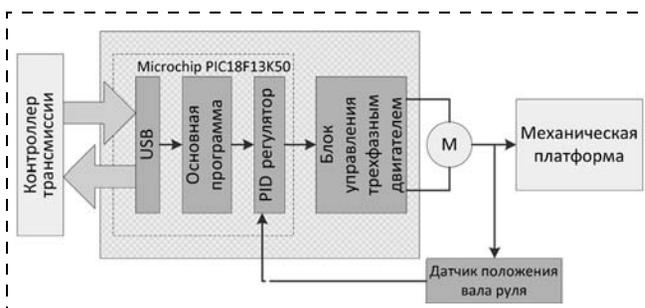


Рис. 9. Логическая схема рулевого управления

ра, выход которого идет на блок управления трехфазным двигателем (программа управления аналогична программе управления шаговым двигателем, используемой в регуляторе оборотов двигателя).

Коробка переключения передач. В настоящий момент управление КПП при работе с экспериментальным прототипом выполняется по следующему сценарию переключения передач:

- 1) контроллер трансмиссии принимает решение о переключении передачи;
- 2) контроллер трансмиссии выжимает педаль сцепления;
- 3) на экран компьютера пилота выводится номер передачи, которую необходимо включить в данный момент;
- 4) пилот вручную переключает и с помощью пользовательского интерфейса подтверждает включение заданной передачи;
- 5) контроллер трансмиссии отпускает педаль сцепления.



Рис. 10. Фотография экспериментального автомобиля VAZ-21214 "Нива"

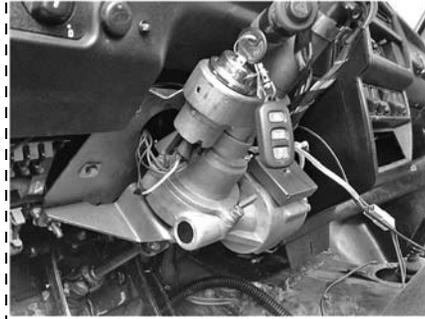


Рис. 11. Фотография установленного устройства рулевого управления на основе электроусилителя руля разработки ОАО "АвтоВАЗ" и завода "Авиаагрегат"

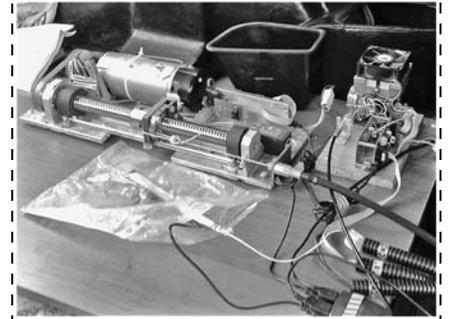


Рис. 12. Фотография привода сцепления, регулятора оборотов двигателя и датчика скорости, установленных на заднем сиденье автомобиля

Результаты эксперимента на серийном автомобиле

Для проведения эксперимента был выбран серийный автомобиль VAZ-21214 "Нива" (рис. 10). На рис. 11, 12 представлены фотографии описанных ранее агрегатов, установленных в экспериментальный автомобиль.

Как указано выше, по результатам моделирования [1] были построены следующие устройства для управления автомобилем: автоматические регулятор оборотов двигателя автомобиля, приводы педалей сцепления и тормоза. Конструкция управляющих агрегатов подразумевает, что водитель-испытатель в любой момент времени может отключить установленные устройства управления, переведя автомобиль в режим ручного управления.

Для реализации алгоритма контроллера трансмиссии использовался специально разработанный пакет прикладного ПО, реализующий взаимодействие с устройствами управления по шине USB и устанавливаемый на ноутбук. На рис. 13 приведен пример интерфейса в режиме управления одним устройством — регулятором оборотов двигателя внутреннего сгорания. С помощью данного интерфейса можно осуществлять как управление устройством (задание целевого значения оборотов двигателя автомобиля), так и настройку параметров ПИД регулятора и актуатора.

На рис. 14 представлен интерфейс управления автомобилем с механической трансмиссией. Оператор во время движения в реальном времени задает необходимые скорость движения автомобиля (*velocity*) и положение колеса рулевого управления (*steering*), а также максимальное значение положения дроссельной заслонки (*throttle*). При этом идет отображение текущего значения вышеперечисленных параметров, а также текущего и целевого (вычисленного контроллером трансмиссии) значений оборотов двигателя автомобиля. Также через интерфейс отображается передача, которую необходимо включить оператору для движения в данный момент.

Во время движения идет запись данных обратной связи, получаемых с устройств управления, в файл для последующего анализа в среде MATLAB.

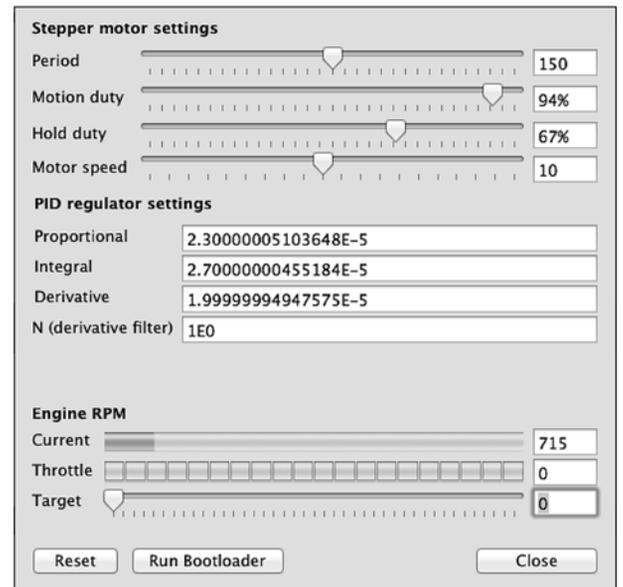


Рис. 13. Настройка и управление регулятором оборотов двигателя

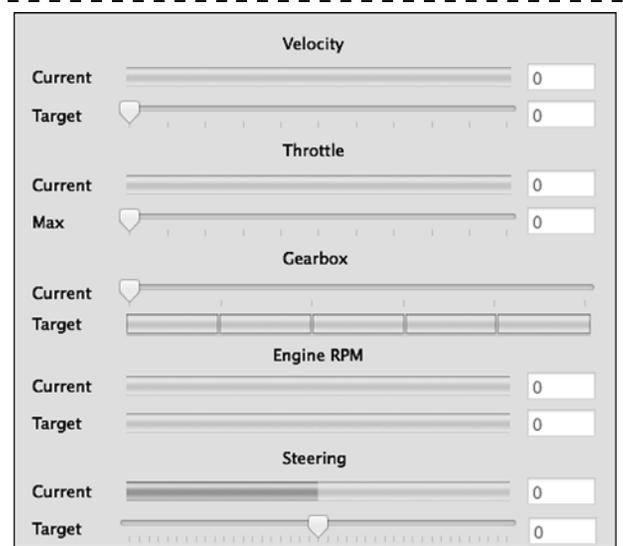


Рис. 14. Интерфейс управления автомобилем с механической трансмиссией

На автомобиле были проверены алгоритмы плавного старта, разгона и торможения на первой передаче, а также переключения передач, полученные в работе [1]. Полученные экспериментальные данные показали соответствие характеристик поведения управляющих устройств модельным.

На рис. 15–17 представлены результаты измерений целевых и текущих параметров трансмиссии во время проведенного эксперимента. В начальный момент времени двигатель заведен и работает на холостом ходу, сцепление автомобиля полностью выжато, педаль тормоза нажата.

В момент времени $t = 2$ с контроллеру трансмиссии задается целевая скорость движения автомобиля $v_{tar} = 1,5$ м/с. Согласно программе контроллер задает целевые обороты двигателя $rpm_{tar} = 2000$ мин⁻¹, после чего начинает постепенно отпускать педаль сцепления. В момент времени $t = 5,5$ с происходит соприкосновение дисков сцепления, и обороты двигателя начинают падать. Фиксируя падение оборотов, контроллер сбавляет скорость отпускания педали. В момент $t = 8$ с прекращается проскальзывание дисков сцепления, а автомобиль достигает скорости $v_{cur} = 2$ м/с (вследствие использования первой передачи и повышенной шестерни раздаточной коробки трогание в данной реализации на ровной дороге происходит с небольшим рывком). При $t = 9$ с контроллер считает сцепление зафиксированным и отпускает педаль.

В дальнейшем при движении целевые обороты двигателя rpm_{tar} выставляются пропорционально целевой скорости автомобиля v_{tar} исходя из текущей выбранной передачи. Это можно наблюдать в моменты времени $t = 28$ с, $t = 130$ с и $t = 137$ с.

В момент времени $t = 154$ с имитируется ситуация возникновения на дороге неожиданного препятствия, при котором водитель нажимает на педаль сцепления и тормоза, останавливая автомобиль к моменту времени $t = 158$ с (поскольку в качестве положения педали сцепления используется значение с оптронного координатного счетчика привода педали, факт выжатой пилотом педали сцепления не фиксируется датчиками из-за ненапрянутого троса). После отпускания педалей водителем, контроллер снова разгоняет автомобиль до заданной скорости.

Изменениям при переносе от модели на реальный автомобиль подвергся алгоритм отпускания педали сцепления во время старта автомобиля, что было обусловлено использованием в *Simulink*-модели линейной модели диафрагменной пружины вместо модели *Belleville*. Указанная модель точнее описывает реальное устройство, в дальнейшем предполагается использовать именно ее.

Построенное в рамках *Simulink*-модели управление основано на использовании регуляторов (в частности, алгоритма ПИД регулятора), что сильно упрощает алгоритм контроллера, позволяя ему работать в целевых значениях, переключая задачу непосредственно достижения этого значения на управляющее устройство. В частности, регулятор

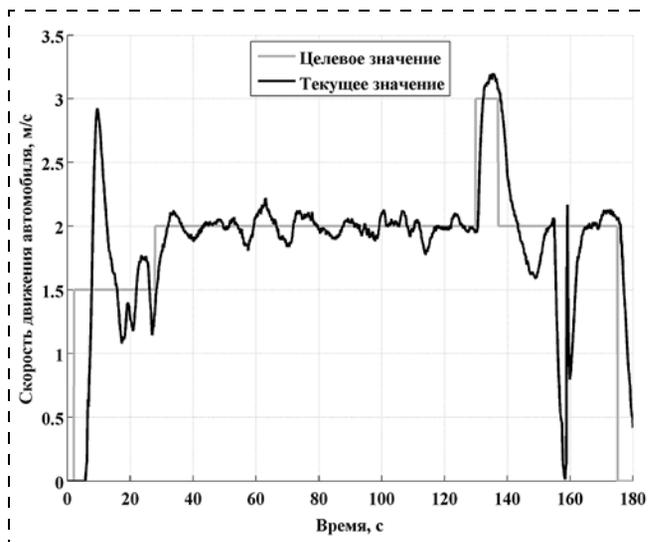


Рис. 15. Целевая и текущая скорость автомобиля в эксперименте

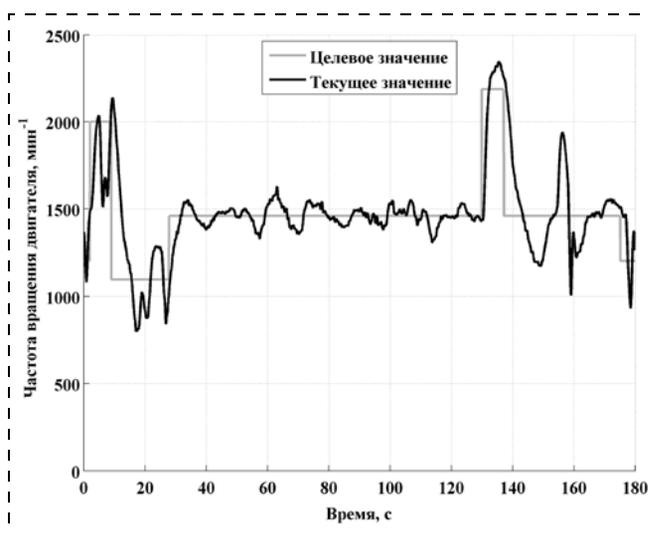


Рис. 16. Целевое и текущее значение оборотов двигателя в эксперименте

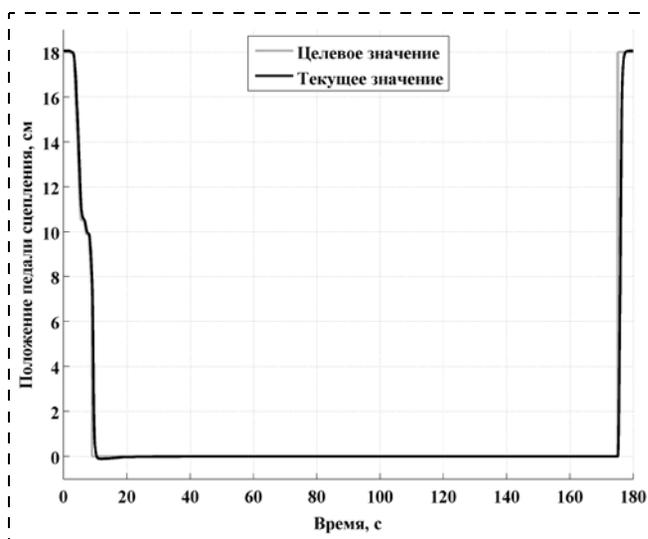


Рис. 17. Целевое и текущее положение педали сцепления в эксперименте

оборотов двигателя принимает от контроллера трансмиссии значение числа требуемых оборотов для достижения заданной скорости и отвечает за их поддержание.

При построенной таким образом схеме сам контроллер трансмиссии, будучи вторым слоем устройств управления, работает по аналогичному принципу: внешнее устройство (пилот-испытатель через интерфейс пользователя или, в дальнейшем, система управления верхнего уровня) задает необходимую скорость автомобиля, которую контроллер поддерживает согласно своей программе.

Несмотря на необходимость дополнительной калибровки и тонкой настройки программных параметров по сравнению с модельными, алгоритмы контроллера трансмиссии и управляющих устройств, а также выстроенная схема взаимодействия между ними показали свою работоспособность на практике.

Выводы

В предыдущей работе [1] создана компьютерная динамическая модель автомобиля, позволяющая осуществлять достаточно точный анализ и синтез алгоритма контроллера трансмиссии. На основе анализа данной модели были сконструированы, изготовлены и протестированы отдельные устройства управления автомобилем. Для управления этими устройствами и реализации алгоритма контроллера трансмиссии разработан пакет программного обеспечения, в состав которого входят библиотека взаимодействия с устройствами управления через шину USB, алгоритм работы контроллера и графическая оболочка водителя-испытателя. На его основе для исследования задачи построения роботизированного автомобиля и разработан и установлен в автомобиль программно-аппаратный комплекс управления. Получен следующий основной вывод: реализация синтезированных с помощью предложенной в работе динамической модели алгоритмов управления показала высокую степень применимости модели для этого класса задач. Автомобиль под управлением созданных устройств и алгоритмов обеспечивает точность движения, аналогичные достижимой при управлении человеком. Динамика трогания и движения на низших передачах сохраняется.

Методика построения программно-аппаратного комплекса управления позволяет с минимальными затратами адаптировать устройства управления под другие автомобили, в том числе оснащенные автоматической коробкой переключения передач.

Разработанный прототип комплекса программного обеспечения позволил определить варианты развития при построении полной системы управления автомобилем, состоящей из целого ряда СЧУ и СВУ. В частности, были сделаны следующие выводы:

- системы автомобиля разделяются на критические системы реального времени (управление тормозной системой, определение возникающих на дороге препятствий) и другие системы (навигация, маршрутизация);
- определенные задачи (например, система компьютерного зрения) требуют больших компьютерных ресурсов (процессорного времени и пропускной способности периферийных устройств);
- взаимодействие между различными устройствами автомобиля (как непосредственными устройствами управления, так и композитными устройствами вроде контроллера трансмиссии), выстроенное в виде дерева, приводит к неэффективности взаимодействия (в частности, в выполненной работе алгоритм отпускания педали сцепления при трогании зависит от динамики оборотов двигателя автомобиля, но соответствующее значение не доступно устройству управления педалью сцепления).

Исходя из этих соображений развитие программно-аппаратного комплекса видится в построении распределенной компьютерной сети, каждый элемент которой отвечает за выполнение своих задач. При этом взаимодействие между ними строится по типу компьютерной шины (аналогично тому, как в современных автомобилях используется CAN-шина для взаимодействия между различными аппаратными агрегатами). Данное решение призвано повысить надежность и расширяемость системы, улучшить динамические характеристики различных устройств.

Список литературы

1. **Павловский В. Е., Огольцов В. Н.** Динамическая модель механической трансмиссии автомобиля // Спецтехника и связь. 2012. № 5—6. С. 27—36.
2. **Vidal J.** UK road traffic rises 25 % in 15 years [Online] // *Guardian*. 2009. URL: <http://www.guardian.co.uk/environment/2009/mar/18/road-emissions-traffic>
3. **Lynch M.** Road traffic growth to grow significantly in 20 years [Online] // *New Civ. Eng.* 2011. URL: <http://www.nce.co.uk/news/transport/road-traffic-growth-to-grow-significantly-in-20-years-says-report/8622802.article>
4. **DARPA Grand Challenge** [Online] // *Wikipedia, Free Encycl.* URL: http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge
5. **Соревнования** автомобилей-роботов в России [Online]. URL: <http://habrahabr.ru/post/144515/>
6. **Wikipedia.** GoogleDriverlessCar [Online]. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Google_driverless_car
7. **Козорез Д. А., Кружков Д. М.** Состав и структура автономных систем навигации и управления роботизированного прототипа автомобиля // Спецтехника и связь. 2012. № 3. С. 15—18.
8. **Носков В. П., Рубцов И. В.** Ключевые вопросы создания интеллектуальных мобильных роботов // *Инженерный журнал наука и инновации*. 2013. № 3.
9. **BCX** двигателя ВАЗ-21213 1,7л [Online]. URL: <http://www.mmotor.ru/cams/index.php?action=vsh&type=vaz&model=2101-2107&id=4>
10. **РЕМОНТ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИЯ** ВАЗ 21213, 21214 (Нива) [Online]. URL: <http://www.autoprospect.ru/vaz/21213-niva/1-2-tehnicheskie-kharakteristiki-avtomobilej.html>
11. **Crankshaft Position Sensor** [Online] // *Wikipedia, Free Encycl.* URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Crankshaft_position_sensor

УДК 681.3.07

Н. Г. Чикуров, канд. техн. наук, доц., tchikurov@yandex.ru,
Уфимский государственный авиационный технический университет

Управление движением инструмента на пятикоординатных станках с ЧПУ

На примере пятикоординатного металлорежущего станка с ЧПУ показана методика математического моделирования движений инструмента относительно детали с использованием принципа электроаналогий. Получено решение задачи пятикоординатной трансформации в виде дифференциально-алгебраических уравнений.

Ключевые слова: математическое моделирование систем, метод электромеханических аналогий, манипулятор, обработка сложнопрофильных деталей

N. G. Tchikurov

Tool Traffic Control on 5 Coordinate Machine Tools with CNC

On an example 5 coordinate machine tools with CNC the technique of mathematical modelling of movements of the tool concerning a detail with use of the principle of electromechanical analogies is shown. The decision of a problem 5 coordinate transformations in the form of the differentially-algebraic equations is received.

Keywords: mathematical simulation, method of electromechanical analogies, the manipulator, processing of difficult profiles

Введение

Современная технология механической обработки сложнопрофильных деталей основывается на применении многокоординатных станков с компьютерными системами ЧПУ. При подготовке управляющих программ (УП) для таких станков пространственная траектория обработки, как правило, задается в виде ломаной линии. В системе ЧПУ контур детали аппроксимируется с помощью кривых более высокого порядка и воспроизводится на станке чаще всего в режиме сплайновой интерполяции.

В УП условно считается, что деталь неподвижна, а инструмент перемещается относительно неподвижной детали. В связи с этим в системе ЧПУ необходимо рассчитать все реальные поступательные и вращательные движения инструмента и детали и воспроизвести эти движения на станке с помощью следящих электроприводов подачи. Эта задача для пятикоординатных станков называется *задачей пятикоординатной трансформации*.

Задача пятикоординатной трансформации подобна обратной позиционной задаче, решаемой в робототехнике, когда при заданном положении и ориентации конечного звена механизма требуется определить его обобщенные координаты [1, 2].

Виртуальная кинематическая схема пятикоординатного станка может быть представлена в виде многозвенного манипулятора (рис. 1). На схеме показана закрепленная неподвижно обрабатываемая деталь, относительно которой движется вкру-

говую, по спирали, инструмент (торцовая фреза). Звенья 1 и 7 движутся вращательно относительно смежных звеньев, а звенья 2, 4 и 6 — поступательно. Считая заданным закон движения инструмента относительно детали, требуется найти изменения круговых и линейных перемещений. Реальный станок

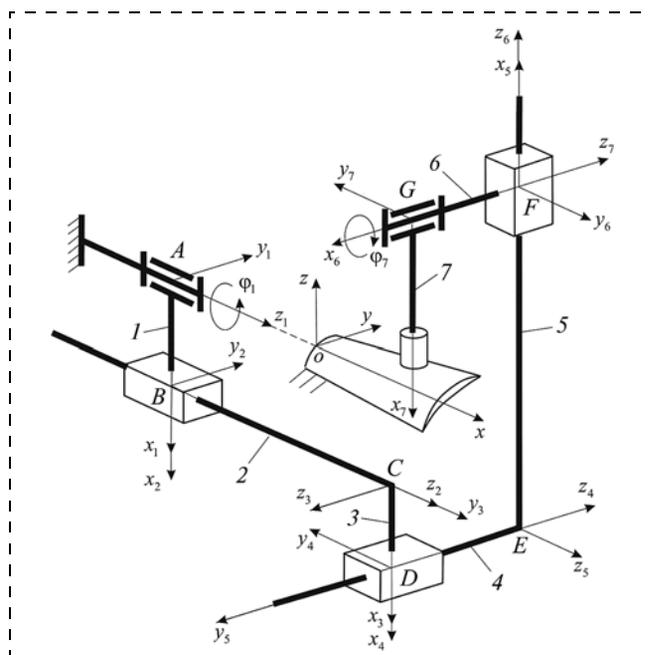


Рис. 1. Виртуальный манипулятор

не может сам совершать круговое движение φ_1 . Поэтому в действительности на угол φ_1 с обратным знаком поворачивается деталь.

Синтез кинематической модели станка

Привлечем для решения задачи пятикоординатной трансформации методику математического моделирования манипуляционных роботов с использованием принципа электроаналогий [3, 4]. Особенность новой методики состоит в том, что задающим воздействием служит не вектор положения последнего звена, а вектор скорости этого звена при его движении по заданной траектории. Следовательно, для рассматриваемого робота решается обратная задача не о положениях, а обратная задача о скоростях. Если необходимо, то, проинтегрировав функцию скорости некоторого звена, можно всегда получить информацию о его положении.

Построим с позиций этой методики кинематическую модель нашего виртуального манипулятора. Основу кинематической модели составляют две системы уравнений: система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и система дифференциальных уравнений (СДУ). Обе системы уравнений (СЛАУ и СДУ) взаимосвязаны и образуют замкнутую дифференциально-алгебраическую систему уравнений. СЛАУ определяет переменные в правых частях СДУ, а СДУ определяет переменные в СЛАУ [4, 5].

В состав СЛАУ входят основные кинематические уравнения 1-го порядка, уравнения связи для вращательных и для поступательных пар, а также уравнения вектора задающих воздействий.

В состав СДУ входят ДУ для звеньев постоянной длины, связанных с вращательными парами, ДУ для звеньев переменной длины, связанных с поступательными парами типа 1 или типа 2, и ДУ обобщенных координат.

Данных видов уравнений достаточно, чтобы построить модель манипулятора любой произвольной структуры, состоящей из вращательных и поступательных кинематических пар. Совместное решение дифференциальных уравнений и системы линейных уравнений дает решение искомой задачи.

Основные кинематические уравнения 1-го порядка. Основные кинематические уравнения 1-го порядка выведены на основе метода электроаналогий, предусматривающего декомпозицию манипуляционного робота [4]. Предполагается, что кинематические пары в точках сопряжений условно разъединены. Каждая из этих точек разделена на две точки, соответствующие началу одного звена и концу другого звена. Точка, расположенная в начале звена, если двигаться от первого звена к последнему, обозначена символом m_i , а точка, расположенная в конце звена, — символом n_i . Здесь i — номер звена, к которому привязана точка.

Под действием реакций в точках сочленений m_i и n_i звено движется поступательно и одновременно вращается вокруг центра масс, т. е. звено имеет шесть степеней свободы. С помощью метода электроаналогий были выведены основные кинемати-

ческие уравнения 1-го порядка, которые определяют движение такого звена:

$$\begin{aligned} V_{mix} - V_{nix} + R_{iz}\omega_{iy} - R_{iy}\omega_{iz} &= 0; \\ V_{miy} - V_{niy} + R_{ix}\omega_{iz} - R_{iz}\omega_{ix} &= 0; \\ V_{miz} - V_{niz} + R_{iy}\omega_{ix} - R_{ix}\omega_{iy} &= 0, \\ i &= 1, 2, \dots, S_q, \end{aligned} \quad (1)$$

где V_{mi} — вектор линейной скорости начальной точки звена; V_{ni} — вектор линейной скорости конечной точки звена; R_i — радиус-вектор звена; ω_i — вектор абсолютной угловой скорости звена; i — номер звена; $S_q = 7$ — общее число звеньев в манипуляторе (числовые значения параметров здесь и далее относятся к рассматриваемому манипулятору); индексы x, y, z обозначают проекции на соответствующие оси.

Выведенные уравнения инвариантны относительно компоновок манипуляторов. Это означает, что вид уравнений не зависит от числа звеньев и числа степеней свободы манипулятора, сочетаний типов и последовательностей кинематических пар. Исходя из этого можно считать, что эти уравнения определяют фундаментальное решение задачи.

Рассмотренные кинематические уравнения 1-го порядка следует рассматривать как СЛАУ относительно неизвестных векторов V_{mi}, V_{ni}, ω_i . Входящие в уравнения векторы R_i будут далее найдены из дифференциальных уравнений.

Полученный в результате декомпозиции виртуальный манипулятор упрощает процедуру синтеза математической модели, но физически такой манипулятор существовать не может. Чтобы устранить указанное противоречие, используются уравнения связи, которые на математическом уровне придают виртуальным кинематическим парам реальные свойства, т. е. учитывают физическую конструкцию кинематических пар, относящихся к кинематическим парам пятого класса.

Определение уравнений связи. Уравнения связи устанавливают соотношения между угловыми или линейными скоростями смежных звеньев. В зависимости от типа кинематических пар, соединяющих звенья, уравнения связи подразделяются на три вида: для вращательных пар; для поступательных пар; для неподвижных соединений. Рассмотрим эти пары.

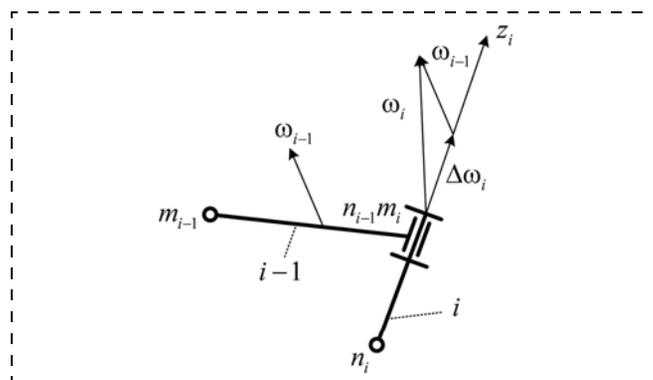


Рис. 2. Вращательная кинематическая пара

▲ Вращательная пара

Во вращательной паре звено $i - 1$ соединено со звеном i осью (рис. 2).

С осью вращательной пары связана координатная ось z_i . Орт k_i этой оси задан в базовой системе координат с помощью направляющих косинусов.

Уравнения связи для вращательной пары имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} & [k_{ix}(k_{ix} + k_{iy}) - 1]\Delta\omega_{ix} + [k_{iy}(k_{ix} + k_{iy}) - 1]\Delta\omega_{iy} + \\ & + [k_{iz}(k_{ix} + k_{iy})]\Delta\omega_{iz} = 0; \\ & [k_{ix}(k_{iy} + k_{iz})]\Delta\omega_{ix} + [k_{iy}(k_{iy} + k_{iz}) - 1]\Delta\omega_{iy} + \\ & + [k_{iz}(k_{iy} + k_{iz}) - 1]\Delta\omega_{iz} = 0; \\ & [k_{ix}(k_{ix} + k_{iz}) - 1]\Delta\omega_{ix} + [k_{iy}(k_{ix} + k_{iz})]\Delta\omega_{iy} + \\ & + [k_{iz}(k_{ix} + k_{iz}) - 1]\Delta\omega_{iz} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$i = a_1, a_2, \dots, a_{S_a},$$

где a_j — номер звена, соединенного с предыдущим звеном посредством вращательной пары ($a_1 = 1, a_2 = 7$); $S_a = 2$ — число вращательных пар.

К уравнениям связи относятся также уравнения для линейных и для угловых скоростей в координатной форме:

$$\begin{aligned} & V_{mix} - V_{n(i-1)x} = 0; \omega_{ix} - \omega_{(i-1)x} - \Delta\omega_{ix} = 0; \\ & V_{miy} - V_{n(i-1)y} = 0; \omega_{iy} - \omega_{(i-1)y} - \Delta\omega_{iy} = 0; \\ & V_{miz} - V_{n(i-1)z} = 0; \omega_{iz} - \omega_{(i-1)z} - \Delta\omega_{iz} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$i = a_1, a_2, \dots, a_{S_a}.$$

▲ Поступательные пары

Поступательные пары подразделяются на два типа. В поступательной паре 1-го типа радиус-вектор звена i имеет постоянную длину, а радиус-вектор R_{i-1} звена $(i - 1)$ — переменную длину (рис. 3, а). В поступательной паре 2-го типа радиус-вектор R_i звена i имеет переменную длину, а радиус-вектор звена $(i - 1)$ — постоянную длину (рис. 3, б). В процессе движения длина (точнее расстояние R_i между точками m_i и n_i) этого звена изменяется. Звенья с изменяющимся параметром R_i или R_{i-1} будем называть *звеньями переменной длины*.

Уравнения связи для поступательных пар определяются с помощью векторного сложения линейных скоростей точек n_{i-1} и m_i . Эти векторные по-

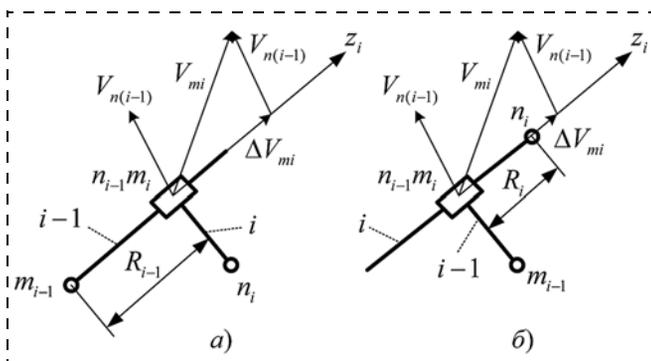


Рис. 3. Поступательные кинематические пары: а — тип 1; б — тип 2

строения для поступательных кинематических пар обоих типов совпадают (рис. 3, а, б). Следовательно, уравнения связи для них общие.

Уравнения связи для поступательных кинематических пар имеют вид

$$\begin{aligned} & [k_{ix}(k_{ix} + k_{iy}) - 1]\Delta V_{mix} + [k_{iy}(k_{ix} + k_{iy}) - 1]\Delta V_{miy} + \\ & + [k_{iz}(k_{ix} + k_{iy})]\Delta V_{miz} = 0; \\ & [k_{ix}(k_{iy} + k_{iz})]\Delta V_{mix} + [k_{iy}(k_{iy} + k_{iz}) - 1]\Delta V_{miy} + \\ & + [k_{iz}(k_{iy} + k_{iz}) - 1]\Delta V_{miz} = 0; \\ & [k_{ix}(k_{ix} + k_{iz}) - 1]\Delta V_{mix} + [k_{iy}(k_{ix} + k_{iz})]\Delta V_{miy} + \\ & + [k_{iz}(k_{ix} + k_{iz}) - 1]\Delta V_{miz} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$i = b_1, b_2, \dots, b_{S_b},$$

где b_j — номер звена, соединенного с предыдущим звеном посредством поступательной пары ($b_1 = 2, b_2 = 4, b_3 = 6$); $S_b = 3$ — число поступательных пар;

К уравнениям связи относятся также уравнения

$$\begin{aligned} & \omega_{ix} - \omega_{(i-1)x} = 0; V_{mix} - V_{n(i-1)x} - \Delta V_{mix} = 0; \\ & \omega_{iy} - \omega_{(i-1)y} = 0; V_{miy} - V_{n(i-1)y} - \Delta V_{miy} = 0; \\ & \omega_{iz} - \omega_{(i-1)z} = 0; V_{miz} - V_{n(i-1)z} - \Delta V_{miz} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$i = b_1, b_2, \dots, b_{S_b}.$$

Выведенные уравнения связи применимы как для поступательных пар типа 1, так и для поступательных пар типа 2.

▲ Неподвижное соединение

Если конструкция звена имеет форму ломаного рычага, то такое звено в виртуальном манипуляторе можно представить в виде двух разъединенных звеньев. В действительности эти звенья соединены неподвижным соединением (рис. 4).

Уравнения связи для жестко соединенных между собой звеньев i и $i - 1$ имеют вид

$$\begin{aligned} & \omega_{ix} - \omega_{(i-1)x} = 0; V_{mix} - V_{n(i-1)x} = 0; \\ & \omega_{iy} - \omega_{(i-1)y} = 0; V_{miy} - V_{n(i-1)y} = 0; \\ & \omega_{iz} - \omega_{(i-1)z} = 0; V_{miz} - V_{n(i-1)z} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

$$i = c_1, c_2, \dots, c_{S_c},$$

где c_j — номер звена, соединенного с предыдущим звеном посредством неподвижного соединения ($c_1 = 3, c_2 = 5$); $S_c = 2$ — число неподвижных соединений.

Уравнения связи (2)—(6) надо рассматривать как линейные алгебраические уравнения с постоянными коэффициентами относительно неизвестных со-

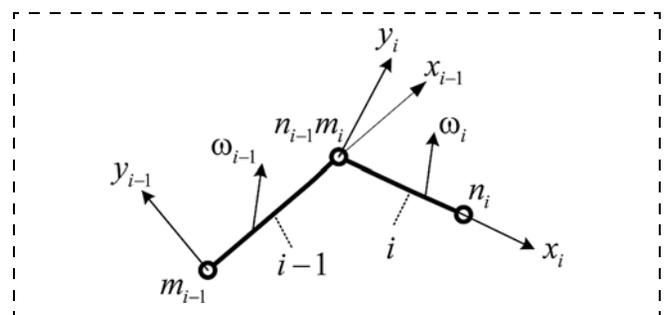


Рис. 4. Неподвижное соединение

ставляющих $\Delta\omega_i$, либо ΔV_i . Определитель системы уравнений связи, куда входят коэффициенты k_i , равен нулю. Поэтому можно использовать только два некоторых уравнения этой системы.

Известно, что решение обратной позиционной задачи для манипуляционных роботов наталкивается на проблему "особых точек" [1, 2]. Особые точки — это точки траектории, в которых решение обратной позиционной задачи манипулятора приводит к появлению деления на нуль.

В нашей системе причиной появления таких точек являются уравнения связи. В особых точках линейные алгебраические уравнения связи становятся несовместными. Это происходит по одной из двух причин: все три коэффициента одного из уравнений связи обращаются в нуль или два уравнения связи становятся линейно-зависимыми.

Чтобы в процессе решения задачи обойти особые точки, необходимо на каждом шаге интегрирования дифференциальных уравнений анализировать состояние коэффициентов в уравнениях связи. Если все три коэффициента в любом из трех уравнений связи, изменяясь, приближаются к нулю или любая пара уравнений связи становится линейно-зависимой, необходимо переключиться на другую пару уравнений связи. Для этого в программу управления введена специальная функция **proverka()** [5].

Вектор задающих воздействий. Чтобы получить замкнутую СЛАУ, основных кинематических уравнений и уравнений связи недостаточно. Число неизвестных оказывается больше числа уравнений. В связи с этим необходимо самим задать некоторое число переменных. Эти переменные образуют *вектор задающих воздействий*, который определяет (задает) траекторию движения робота в пространстве. Число задающих воздействий зависит от числа степеней свободы, т. е. от числа звеньев и числа кинематических пар (см. таблицу).

Например, для трехзвенного манипулятора вектором задающих воздействий может служить вектор скорости конечной точки (три задающих воздействия), движущейся по некоторой заданной траектории. Для шестизвенного манипулятора можно определить векторы скоростей для двух точек (шесть задающих воздействий), одна из которых движется по заданному контуру, а вторая — по эквидистанте к этому контуру.

Математическая функция вектора задающих воздействий V может определяться различными

уравнениями, связывающими между собой некоторые переменные V_i с текущими координатами точек траектории x, y, z :

$$V_i = V_i(x, y, z), i = 1, 2, \dots, S_V,$$

где S_V — число задающих воздействий, определяемых по таблице.

Дифференциальные уравнения движений звеньев. Дифференциальные уравнения движений звеньев необходимы для нахождения входящих в основные кинематические уравнения переменных R_i . Эти уравнения подразделяются на три вида: для звеньев постоянной длины; для звеньев переменной длины с поступательной парой типа 1; для звеньев переменной длины с поступательной парой типа 2.

Рассмотрим эти уравнения.

▲ Звено постоянной длины

Пусть некоторое звено i постоянной длины совершает сложное движение, которое можно представить как сочетание поступательного и вращательного движений.

При поступательном движении звена его проекции на оси координат не изменяются. При сферическом движении проекции координат можно найти с помощью следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dR_{ix}}{dt} &= V_{nix} - V_{mix}; \\ \frac{dR_{iy}}{dt} &= V_{niy} - V_{miy}; \\ \frac{dR_{iz}}{dt} &= V_{niz} - V_{miz}, \\ i &= d_1, d_2, \dots, d_{S_d}, \end{aligned} \quad (7)$$

где d_j — номер звена постоянной длины ($d_1 = 1, d_2 = 3, d_3 = 6, d_4 = 7$); $S_d = 4$ — число звеньев постоянной длины.

▲ Звенья переменной длины

Рассмотрим звенья, образующие поступательные кинематические пары.

В поступательной кинематической паре типа 1 (см. рис. 3, а) звено i имеет постоянную длину, и его движение определяется уравнениями (7). Длина звена $i - 1$ в процессе движения изменяется, т. е. это звено переменной длины. Увеличим индекс i на 1. Тогда для звена переменной длины система дифференциальных уравнений движения примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dR_{ix}}{dt} &= V_{m(i+1)x} - V_{mix}; \\ \frac{dR_{iy}}{dt} &= V_{m(i+1)y} - V_{miy}; \\ \frac{dR_{iz}}{dt} &= V_{m(i+1)z} - V_{miz}, \\ i &= e_1, e_2, \dots, e_{S_e}, \end{aligned} \quad (8)$$

Анализ числа задающих воздействий

Число звеньев и число кинематических пар	Число уравнений в СЛАУ	Число неизвестных	Число задающих воздействий S_V
1 звено + 1 пара	8	9	1
2 звена + 2 пары	16	18	2
3 звена + 3 пары	24	27	3
4 звена + 4 пары	32	36	4
5 звеньев + 5 пар	40	45	5
6 звеньев + 6 пар	48	54	6

где e_j — номер звена переменной длины, связанного с поступательной парой типа 1 ($e_1 = 5$); $S_e = 1$ — число таких звеньев.

Рассмотрим звено переменной длины i , связанное с поступательной кинематической парой типа 2 (см. рис. 3, б). Система дифференциальных уравнений движения для такого звена имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dR_{ix}}{dt} &= V_{nx} - V_{n(i-1)x}; \\ \frac{dR_{iy}}{dt} &= V_{ny} - V_{n(i-1)y}; \\ \frac{dR_{iz}}{dt} &= V_{nz} - V_{n(i-1)z}; \\ i &= g_1, g_2, \dots, g_{S_g}, \end{aligned} \quad (9)$$

где g_j — номер звена переменной длины, связанного с поступательной парой типа 2 ($g_1 = 2, g_2 = 4$); $S_g = 2$ — число таких звеньев.

Таким образом, движение звена переменной длины, связанное с поступательной парой типа 1, определяется дифференциальными уравнениями (8), а движение аналогичного звена, связанного с поступательной парой типа 2 — уравнениями (9). Данные уравнения определяют фундаментальное решение задачи, поскольку они применимы для разнообразных компоновок манипуляторов.

Дифференциальные уравнения обобщенных координат. В качестве обобщенных координат требуется определить угловые положения звеньев, связанных с вращательными кинематическими парами, и линейные положения звеньев, связанных с поступательными кинематическими парами. Дифференциальные уравнения обобщенных координат подразделяются на три вида: для звеньев, связанных с вращательными кинематическими парами; для звеньев, связанных с поступательными кинематическими парами типа 1; для звеньев, связанных с поступательными кинематическими парами типа 2. Рассмотрим эти уравнения.

▲ Вращательные кинематические пары

Чтобы найти угловое положение некоторого звена i относительно смежного звена $i - 1$, надо спроектировать приращение вектора угловой скорости $\Delta\omega_i$ на ось z_i (см. рис. 2). Тогда относительное угловое положение φ_i этого звена найдем из дифференциального уравнения

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_i}{dt} &= \Delta\omega_{ix}k_{ix}(\varphi_i) + \Delta\omega_{iy}k_{iy}(\varphi_i) + \Delta\omega_{iz}k_{iz}(\varphi_i), \\ i &= a_1, a_2, \dots, a_{S_a}, \end{aligned} \quad (10)$$

где a_j — номер звена, соединенного с предыдущим звеном посредством вращательной пары ($a_1 = 1, a_2 = 7$); $S_a = 2$ — число вращательных пар.

▲ Поступательные кинематические пары

Рассмотрим линейное положение звена $i - 1$, связанного с поступательной кинематической парой типа 1, относительно звена i (см. рис. 3, а). Увеличим индекс i на 1. Тогда положение рассмат-

риваемого звена определится с помощью дифференциального уравнения

$$\begin{aligned} \frac{dR_i}{dt} &= \Delta V_{m(i+1)x}k_{(i+1)x}(\varphi_i) + \\ &+ \Delta V_{m(i+1)y}k_{(i+1)y}(\varphi_i) + \Delta V_{m(i+1)z}k_{(i+1)z}(\varphi_i), \\ i &= e_1, e_2, \dots, e_{S_e}, \end{aligned} \quad (11)$$

где e_j — номер звена переменной длины, связанного с поступательной парой типа 1 ($e_1 = 5$); $S_e = 1$ — число таких звеньев.

Положение звена i , связанного с кинематической парой типа 2 (см. рис. 3, б), относительно звена $i - 1$ определяется с помощью дифференциального уравнения

$$\begin{aligned} \frac{dR_i}{dt} &= \Delta V_{mix}k_{ix}(\varphi_i) + \Delta V_{miy}k_{iy}(\varphi_i) + \Delta V_{miz}k_{iz}(\varphi_i), \\ i &= g_1, g_2, \dots, g_{S_g}, \end{aligned} \quad (12)$$

где g_j — номер звена переменной длины, связанного с поступательной парой типа 2 ($g_1 = 2, g_2 = 4$); $S_g = 2$ — число таких звеньев.

Дифференциальные уравнения обобщенных координат (10)–(12) универсальные, т. е. их можно использовать для любых манипуляторов, состоящих из сочетания вращательных и поступательных пар.

Управление движением инструмента на пятикоординатном станке в режиме сферической интерполяции

В современных системах ЧПУ для аппроксимации точно заданных контуров предпочитают применять параметрические сплайн-функции. Однако наши исследования показали, что в тех случаях, когда в системе ЧПУ совместно с задачей аппроксимации должна быть решена и задача пространственной 3D-коррекции размеров деталей, то целесообразнее контуры обработки аппроксимировать с помощью дуг окружностей.

Зададим движение конечной точки нашего манипулятора по контуру, который представляет собой дугу окружности, ориентированную произвольно в пространстве. Окружность расположена на поверхности сферы. Поэтому такой режим движения называется режимом *сферической интерполяции*.

Предположим, что надо осуществить движение конечной точки n_7 звена 7 по некоторому контуру, расположенному на поверхности сферы, с некоторой заданной скоростью V_{n7} (рис. 5). Сущность 3D-коррекции сводится к смещению предполагаемого инструмента, закрепленного на конце звена 7, в направлении нормали \bar{N} к обрабатываемой поверхности. Ориентация этого звена в пространстве задается в управляющей программе.

Из-за ограниченного объема статьи рассмотрим упрощенную задачу сферической интерполяции, без учета геометрии инструмента, устанавливаемого в шпинделе станка. Примем простое условие, что звено 7 всегда должно быть ориентировано по нормали \bar{N} к поверхности.

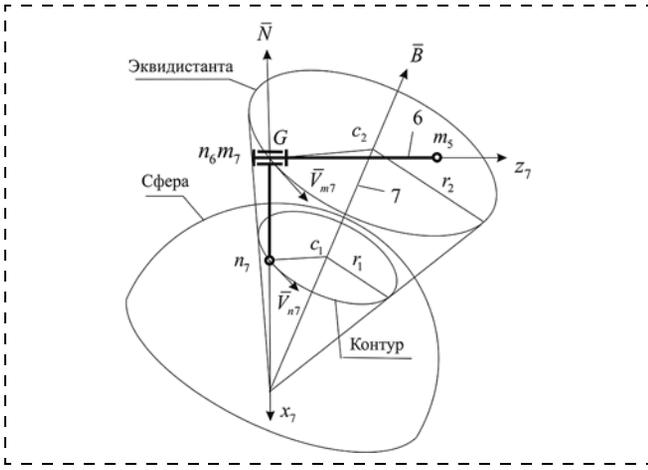


Рис. 5. Движение конечной точки манипулятора по заданному контуру

Кинематическая модель станка имеет пять степеней свободы. Следовательно, необходимо задать пять уравнений задающих воздействий (см. таблицу). Эти уравнения надо составить так, чтобы конечная точка звена 7 двигалась по заранее заданной траектории с одновременной ориентацией этого звена в направлении вектора нормали \bar{N} .

Чтобы решить эту задачу, зададим два вектора скорости. Первый вектор определяет скорость движения конечной точки n_7 звена 7 по контуру обработки, а второй вектор задает скорость начальной точки m_7 этого звена по эквидистанте к контуру обработки. Положение оси звена 7 в пространстве изменяется в соответствии с изменением вектора нормали к обрабатываемой поверхности. В результате на станке воспроизводится годограф вектора оси данного звена, который представляет собой эквидистанту, расположенную от контура обработки на одинаковом расстоянии, равном длине (модулю) вектора оси звена 7. Все эволюции этого звена определяются с помощью направляющих косинусов, которые задаются в управляющей программе.

Поскольку два вектора, определяющих скорости движения двух точек по контуру и по эквидистанте, имеют шесть компонент, то один из этих векторов надо задать только с помощью двух компонент. Например, скорость по эквидистанте достаточно определить лишь по осям x и y . В дальнейшем недостающая составляющая скорости по оси z определится автоматически в процессе решения СЛАУ.

Запишем общую систему дифференциальных уравнений для этого режима:

$$\begin{aligned} \frac{dx_{n7}}{dt} &= V_{n7x}; \\ \frac{dy_{n7}}{dt} &= V_{n7y}; \\ \frac{dz_{n7}}{dt} &= V_{n7z}. \end{aligned} \quad (13)$$

Правая часть дифференциальных уравнений (13) представляет собой вектор задающего воздействия, который определяет скорость конечной точки n_7

манипулятора. Координаты этого вектора скорости определяются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} V_{n7x} &= \frac{V_1}{r_1} [B(z_{n7} - z_c) - C(y_{n7} - y_c)]; \\ V_{n7y} &= \frac{V_1}{r_1} [C(x_{n7} - x_c) - A(z_{n7} - z_c)]; \\ V_{n7z} &= \frac{V_1}{r_1} [A(y_{n7} - y_c) - B(x_{n7} - x_c)], \end{aligned} \quad (14)$$

где A, B, C — направляющие косинусы нормали к плоскости окружности; x_{n7}, y_{n7}, z_{n7} — текущие координаты точек окружности; x_c, y_c, z_c — координаты центра окружности относительно начальной точки дуги; r_1 — радиус окружности контура; V_1 — контурная скорость.

Эквидистанта, по которой движется точка m_7 манипулятора, рассчитывается путем решения дифференциальных уравнений, аналогичных уравнениям (13):

$$\begin{aligned} \frac{dx_{m7}}{dt} &= V_{m7x}; V_{m7x} = \frac{V_2}{r_2} [B(z_{m7} - z_{c2}) - C(y_{m7} - y_{c2})]; \\ \frac{dy_{m7}}{dt} &= V_{m7y}; V_{m7y} = \frac{V_2}{r_2} [C(x_{m7} - x_{c2}) - A(z_{m7} - z_{c2})]; \\ \frac{dz_{m7}}{dt} &= V_{m7z}; V_{m7z} = \frac{V_2}{r_2} [A(y_{m7} - y_{c2}) - B(x_{m7} - x_{c2})]. \end{aligned} \quad (15)$$

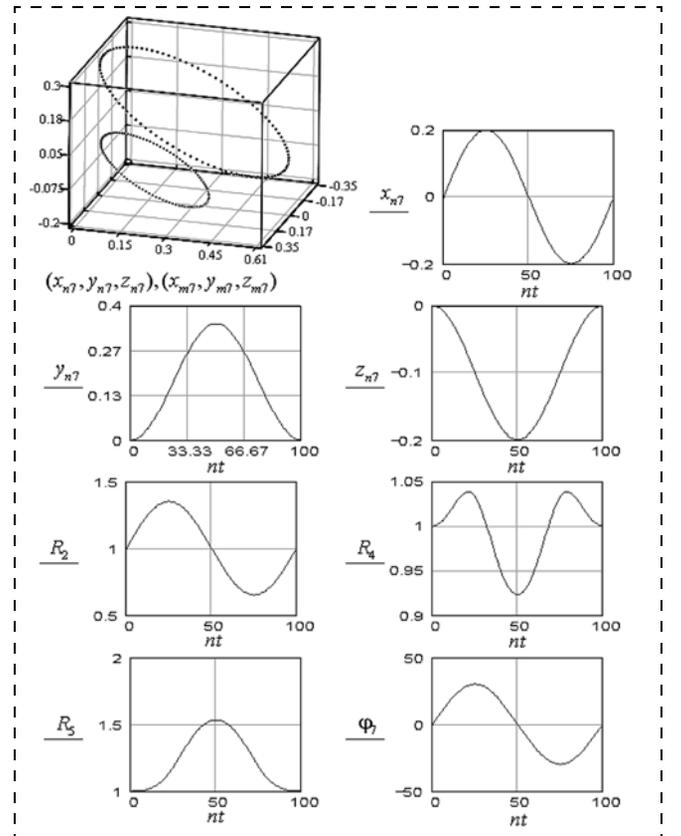


Рис. 6. Изменения переменных системы в режиме сферической интерполяции

Для системы, имеющей пять степеней свободы, необходимо определить пять задающих воздействий, поэтому из уравнений (15) надо выбрать только два любых уравнения. Вместе с уравнениями (14) получим в итоге пять задающих воздействий. Уравнения задающих воздействий запишем в реестр СЛАУ.

Результаты компьютерного моделирования системы управления в режиме сферической интерполяции представлены в виде графиков (рис. 6).

Заключение

На примере пятикоординатного металлорежущего станка показано, что метод электроаналогий позволяет строить имитационные модели многозвенных механизмов универсальным способом [4, 5]. В процессе моделирования применяется численный метод, основанный на решении системы дифференциально-алгебраических уравнений. Приведен

алгоритм пятикоординатной трансформации для систем ЧПУ. Эта задача аналогична обратной позиционной задаче робототехники. Алгоритм обеспечивает устойчивое и точное решение задачи.

Список литературы

1. **Зенкевич С. Л., Ющенко А. С.** Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана 2004. 480 с.
2. **Механика** промышленных роботов: учеб. пособие для вузов. В 3 кн. / Под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. Кн. 1: Кинематика и динамика / Е. И. Воробьев, С. А. Попов, Г. И. Шевелева. М.: Высш. шк. 1988. 304 с.
3. **Чикуров Н. Г.** Синтез математических моделей механических систем методом электроаналогий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 4. С. 37—43.
4. **Чикуров Н. Г.** Моделирование систем и процессов: учеб. пособие. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2013. 398 с.
5. **Чикуров Н. Г.** Построение математических моделей динамических систем на основе метода электроаналогий: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 360 с.

УДК 53, 519.6, 536.3, 666.1.05: 621.373.826

В. С. Кондратенко¹, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, vsk1950@mail.ru,

О. Н. Третьякова², канд. физ.-мат. наук, проф., tretiyakova_olga@mail.ru,

А. С. Наумов¹, канд. техн. наук, докторант, 8097@rambler.ru,

Г. Ю. Шевченко¹, аспирант, shev.gleb@gmail.com, **А. К. Зобов**¹, аспирант, dj.lexa.777@gmail.com,

¹ Московский государственный университет приборостроения и информатики,

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Аппаратно-программные средства управления лазерным технологическим оборудованием для резки приборных пластин

Обсуждается разработка нового эффективного программного обеспечения, необходимого при производстве нового промышленного технологического оборудования в связи с развитием инновационных лазерных технологий. Представлена управляющая программа, которая является составной частью промышленного лазерного технологического комплекса, разрабатываемого в ООО НПЦ "Лазеры и аппаратура ТМ".

Ключевые слова: лазерное управляемое термораскалывание (ЛУТ), УФ лазер, числовое программное управление, лазер, технологический комплекс, управляющая программа

V. S. Kondratenko, O. N. Tretiyakova, A. S. Naumov, G. Yu. Shevchenko, A. K. Zobov

Hardware and Software Tools for Controlling Laser-Processing Equipment for Cutting Instrument Wafers

Production of the new industrial processing equipment in connection with the development of innovative laser technology requires the development of new and effective software. Established control program that is an integral part of the industrial laser technological complex, developed in NPTS "Lasers and equipment TM".

Keywords: laser controlled thermosplitting (LCT), UV-laser, numerical control, laser, processing facility, management software

Введение

При разработке новых лазерных технологий и создании высокоэффективного оборудования на их основе необходимо также постоянно совершенствовать средства управления этим оборудованием. Большинство существующих станков с числовым

программным управлением (ЧПУ) является оборудованием и для механической обработки, работающим на низких скоростях. Разработанное для данного оборудования программное обеспечение (ПО) не всегда можно эффективно применить для высокоскоростных технологий лазерной обработки.

Лазерные технологии стремительно становятся неотъемлемым элементом во многих отраслях современной экономики. Высокая конкуренция на рынке стимулирует разработку все новых инновационных изделий и решений. Программное обеспечение *Laser CNC* разрабатывается как раз для охвата широкого спектра актуальных задач и активно применяется во множестве различных лазерных комплексов в самых разных областях промышленности.

В НПЦ "Лазеры и аппаратура ТМ" была разработана и создана установка МЛП1-1060/355 (далее — установка) для прецизионного разделения пластин из хрупких материалов с применением нового метода лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) с использованием двух лазеров в одном технологическом цикле [1]. Разработка технологического процесса ЛУТ и оборудования для него была осуществлена под руководством профессора В. С. Кондраченко, являющегося автором метода ЛУТ.

Особенности технологического процесса ЛУТ приборных пластин

Большинство современных оптоэлектронных приборов изготавливаются по групповой технологии, когда на подложке из различных материалов осуществляется формирование множества элементов, которые в последующем необходимо разделить на отдельные кристаллы (чипы). Актуальность разработки установки на основе технологии ЛУТ связана с тем, что традиционные технологии разделения пластин имеют ряд недостатков и не позволяют обеспечить выполнение современных требований к технологическим параметрам, таким как качество реза, точность, скорость обработки и другие. До последнего времени наиболее распространенным методом разделения приборных пластин на кристаллы (чипы) являлось скрайбирование, включая лазерное скрайбирование.

Следует выделить следующие основные недостатки традиционной технологии скрайбирования приборных пластин: наличие дополнительной операции механического разламывания; дополнительный брак на операции разламывания; наличие дефектной зоны вдоль линии надреза и разлома; деградация или разрушение эпитаксиальных структур кристаллов за счет мощного энергетического воздействия лазерного излучения.

На смену данной технологии пришла технология разделения приборных пластин методом ЛУТ, которая становится все более востребованной среди крупных производителей. Однако эта технология для эффективной реализации требует дальнейшей оптимизации технологических режимов ЛУТ и создания современного высокотехнологичного оборудования с использованием современных методов и средств управления.

При резке в первом направлении методом ЛУТ с помощью CO_2 -лазера проблем с качеством резки не возникает. Однако при резке во втором направлении возникает необходимость нанесения дефекта

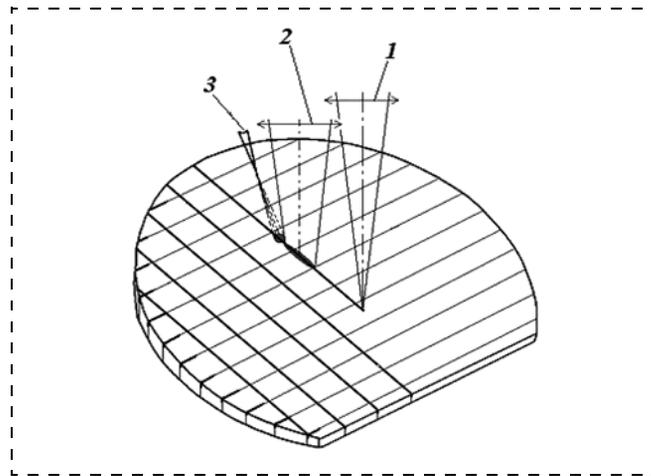


Рис. 1. Схема ЛУТ сапфировой пластины двумя лазерами: 1 — УФ лазер; 2 — CO_2 -лазер; 3 — хладагент

на пересечениях с линиями первого реза из-за повышенной механической прочности кромки после ЛУТ. Первоначально при реализации данной технологии надрез во втором направлении наносился алмазной пирамидкой. Однако при этом качество резки, стабильность и повторяемость процесса резко снижались за счет низкой глубины надреза, появления сколов в местах пересечения резов и ухода линии реза от прямолинейности.

В ходе дальнейших исследований [2, 3] была разработана новая технология лазерной резки приборных пластин из сапфира, кремния и других материалов на кристаллы. Сущность этой технологии заключается в том, что при резке во втором направлении для нанесения надреза был использован ультрафиолетовый лазер (УФ лазер) с последующим ЛУТ с помощью CO_2 -лазера (рис. 1).

После оптимизации технологических режимов лазерной резки приборных пластин на кристаллы на опытной лабораторной установке было принято решение спроектировать и организовать серийный выпуск промышленного оборудования с использованием при резке методом ЛУТ CO_2 -лазера в комбинации с использованием УФ лазера для нанесения начальных надрезов (дефектов).

Схема и конструкция установки

Установка имеет отдельную стойку оператора. В ее состав входит компьютер с установленным на нем виртуальным контроллером *Aerotech A3200*. По СОМ-порту (RS232) компьютер соединен с платой блока контроля и управления (БКУ), следящего за состоянием и управляющего системой охлаждения лазера и самим лазером.

В компьютере установлена также плата дискретного ввода/вывода *Advantech PCI-1751* для управления станочной оснасткой (например, включением подачи хладагента), а также приема сигналов с различных датчиков и блокировок.

Через интерфейс *FireWire (IEEE-1394)*, обеспечивающий скоростную передачу данных (до

400 Мбит/с), к компьютеру подключены блоки сервоусилителей *Aerotech*, управляющие двигателями станка. Между собой блоки также последовательно соединяются интерфейсом *FireWire (IEEE-1394)*. На рис. 2 представлена упрощенная схема связей в установке.

Ключевой особенностью разработанного оборудования является наличие двух лазерных источников излучения — газового CO_2 -лазера и твердотельного УФ лазера с диодной накачкой. Каждый лазер работает в своем оптическом канале, причем оптический канал CO_2 -лазера включает сферическо-цилиндрическую оптику, формирующую лазерный пучок эллиптической формы, направленный вдоль линии разделения.

Сдвоенная оптическая система (УФ канал и CO_2 -канал) формирует два разнесенных на 15...35 мм сфокусированных пятна: "нарезающее" (УФ) и "раскалывающее" (CO_2). Фокусные расстояния объективов $F_1 \approx F_2 \approx 25$ мм.

На одной линии с этими лазерными пучками на расстоянии 0...5 мм за пучком CO_2 -лазера обеспечивается подача хладагента (воздушно-водяной аэрозоли), подаваемой с помощью форсунки. Критерии подачи хладагента, а именно, время начала подачи, количество подаваемого хладагента, соотношение воздушно-жидкостных компонент, а также интенсивность их подачи в зону нагрева автономно программно регулируются с использованием системы подачи воды (0,1...15 мкл/с) и сжатого воздуха (до 6 атм.) с редуктором и дросселем. Включение водяного и воздушного электрических клапанов форсунки, контроль их временных задержек включения, а также датчиков уровня воды и давления воздуха осуществляется исключительно по заданной программе.

Применяемый в установке CO_2 -лазер *Series48* фирмы *Synrad* имеет мощность 50 Ватт и длину волны 10,6 мкм. Данный лазер является основным и служит непосредственно для осуществления процесса ЛУТ.

Для нанесения начального дефекта используется УФ лазер *Nanio* фирмы *INNOLAS* мощностью до 8 Ватт с длиной волны 355 нм.

В качестве системы позиционирования и прецизионного перемещения была использована четырехканальная кинематическая система (координатные столы на базе линейных шаговых двигателей XYZ_ϕ). В целях уменьшения погрешностей в процессе эксплуатации в установке использовано массивное гранитное основание, на котором размещены координатные столы. Координатный (X, Y) крестовой стол имеет повышенную точность позиционирования и служит для прецизионной обработки. Для повышения точности позиционирования проводились замеры с использованием лазерного интерферометра.

На рис. 3 представлен график ошибки позиционирования (в мкм) при проходе всей области хода

для одного из двигателей в прямом и обратном направлениях с шагами по 10 мм.

Столы обеспечивают ускорение до 5 м/с^2 и скорость до 0,5 м/с. Используются датчики положения *Renishaw*. Рабочая зона 200×200 мм. Общий вид координатного стола представлен на рис. 4.

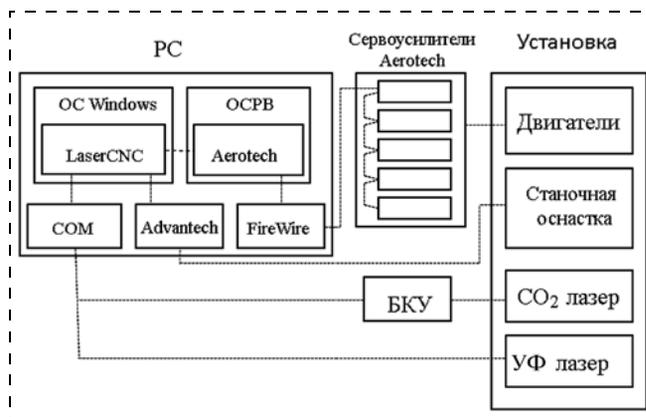


Рис. 2. Схема установки

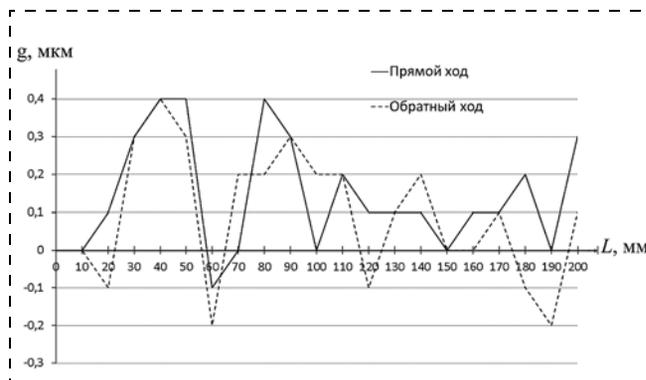


Рис. 3. Ошибка позиционирования одной из осей координатного стола

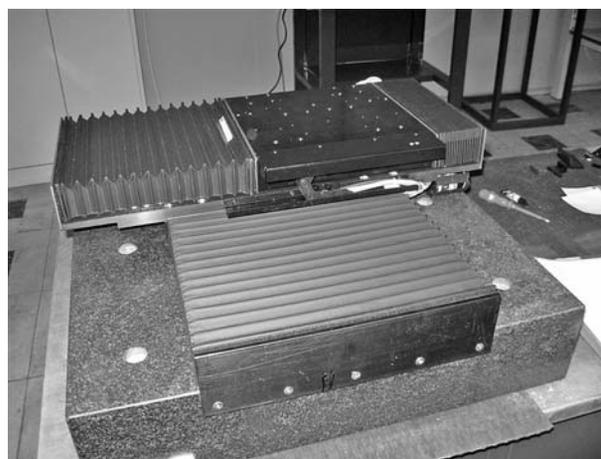


Рис. 4. Крестовой координатный стол лазерного комплекса для прецизионной обработки материалов

Система реального времени

Основной задачей операционных систем реального времени (ОСРВ) является своевременность выполнения обработки данных. В качестве основного требования к ОСРВ выдвигается требование обеспечения предсказуемости или детерминированности ее поведения в наихудших внешних условиях, что резко отличается от требований к производительности и быстродействию, предъявляемых к универсальным операционным системам (ОС) [7–9]. Хорошая ОСРВ имеет предсказуемое поведение при всех сценариях системной загрузки (в том числе, при одновременных прерываниях и выполнении потоков).

Несмотря на свои удобства, сама по себе ОС *Windows* не подходит для применения в приложениях реального времени. Для сохранения ее достоинств и добавления в эту систему поддержки режима реального времени есть различные варианты возможных решений, но наиболее эффективным и гибким является обеспечение сосуществования *Windows* и ОСРВ в одном компьютере и разделении его ресурсов между ОС.

Контроллер *Aerotech*

Контроллер *Aerotech* является виртуальным, поэтому все расчеты проводятся на компьютере в среде реального времени, работающей параллельно с ОС *Windows*. Управление контроллером осуществляется посредством вызовов функций из динамических библиотек *Aerotech*. Инструментальная часть контроллера *Aerotech*, управляющая приводами, представляет собой блоки сервоусилителей, последовательно подключенные к компьютеру через высокоскоростной интерфейс *FireWire (IEEE — 1394)*. Контроллер *Aerotech* использует системы реального времени *RTX* и *INTIME*.

Управляющая программа *LaserCNC*

Установка управляется программным обеспечением (ПО) *LaserCNC*. Интерфейс пользователя предназначен для общего управления станком в ручном режиме, для загрузки в память контроллера управляющих программ, для запуска этих программ на исполнение и для контроля за ходом обработки, а также для диагностики общего состояния системы.

ПО поддерживает различные варианты оснастки лазерного технологического оборудования, различные вариации кинематических систем. Также ПО позволяет использовать различные источники лазерного излучения: волоконные иттербиевые лазеры, фемтосекундные лазеры, *YAG:Nd*-лазеры, *CO₂*-лазеры, лазеры на парах меди и многие другие. Их применение позволяет обрабатывать широкий спектр материалов, включая тугоплавкие металлы, труднообрабатываемые и композитные материалы. Это позволяет успешно применять оборудование, управляемое ПО *LaserCNC*, на предприятиях самых разных отраслей промышленности: электронной, атомной, авиационной, космической, приборо-

строительной, оборонной и многих других, на российских и зарубежных предприятиях малого и среднего бизнеса, работающих в сфере производства продукции широкого назначения, а также в сфере инновационных технологий.

ПО работает под управлением операционной системы *Microsoft Windows (XP и Windows 7)* и взаимодействует с контроллером через вызовы функций из динамических библиотек *DLL (dynamic-link library)* контроллера *Aerotech*, реализующих возможности дополнительно установленной на ПК системы реального времени.

Для задач ЛУТ в ПО *LaserCNC* реализован весь необходимый для работы функционал. В программу добавлены следующие модули:

- точной подстройки и подбора смещений фокуса обоих лазеров относительно фокуса камеры видеонаблюдения;
- подбора оптимального фокусного расстояния;
- выравнивания заготовки;
- подготовки заданий для разделения пластин, в том числе и за один технологический цикл.

Заключение

Создан новый промышленный лазерный технологический комплекс МЛП1-1060/355, разработанный на предприятии ООО НПЦ "Лазеры и аппаратура ТМ", на базе технологии лазерного управляемого термораскалывания, использующий дополнительный УФ лазер для нанесения начального дефекта.

Включение управляющей программы *LaserCNC* в систему управления установкой МЛП1-1060/355 позволило усовершенствовать технологию ЛУТ, устранив ее недостатки, отмеченные в начале статьи, и обеспечить точное соблюдение технологических параметров.

Список литературы

1. Кондратенко В. С., Наумов А. С. Способ резки пластин из хрупких материалов. Патент РФ № 2404931 по заявке № 2009132338/08 от 28.08.2009. Оpubл. 27.11.2010. Бюл. 33.
2. Кондратенко В. С., Наумов А. С. Новая технология лазерной резки сапфировых пластин на кристаллы // Приборы. 2011. № 10 (136). С. 37–41.
3. Kondratenko V. S., Borisovsky V. E., Naumov A. S. New Laser Cutting Technology of Sapphire Wafers on Crystals // Advanced Materials Research. 2013. V. 660. P. 30–34.
4. Кондратенко В. С., Гиндин П. Д., Сорокин А. В., Хлызов В. А. Программа управления промышленными установками лазерного управляемого термораскалывания // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 3. С. 44–47.
5. Третьякова О. Н., Шевченко Г. Ю. Создание управляющих программ для автоматизации процессов лазерного управляемого термораскалывания полупроводниковых и диэлектрических материалов // Вестник МАИ. 2011. Т. 18, № 6. С. 53–67.
6. Кондратенко В. С., Комов В. Г., Миленский М. Н., Третьякова О. Н., Шевченко Г. Ю. Разработка прикладного программного обеспечения для создания лазерного технологического оборудования с вспомогательными кинематическими осями // Приборы. 2013. № 5. С. 26–35.
7. Сосонкин В. Л., Мартинов Г. М. Программирование систем числового программного управления. М.: Логос. Университетская книга, 2008. 344 с.
8. Босинзон М. А. Современные системы ЧПУ и их эксплуатация. М.: Академия, 2010. 192 с.
9. Исаев А. В. *Windows* как ОСРВ с человеческим лицом // Информатизация и системы управления в промышленности. 2011. № 6 (36). URL: <http://isup.ru/articles/15/444/>

В. А. Лебедев, д-р техн. наук, гл. конструктор, ГП ОКБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев,
М. В. Гулый, канд. техн. наук, гл. электроник, ООО "Электротехника — Новые технологии", г. Одесса

Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки

Рассматриваются вопросы разработки быстродействующего безредукторного компьютеризованного вентильного электропривода (ВЭП) для специфического оборудования — систем дуговой сварки плавящимся электродом современного уровня.

Определены основные требования к ВЭП, в частности для реализации импульсной подачи электродной проволоки. Предложены методики расчета и синтеза ВЭП с необходимыми структурами обратных связей и требуемыми характеристиками.

Приведены результаты экспериментальных исследований выполненной разработки в диапазоне воспроизводимых частот, необходимых для управления переносом электродного металла, и сделаны выводы о возможности ее использования.

Ключевые слова: механизированная сварка, автоматизация, электропривод, электродвигатель, регулятор, система управления, эффективность

V. A. Lebedev, M. V. Guly

The High-Speed Valve Electric Drive for the Equipment of the Mechanized Arc Welding

In article questions of development of the high-speed computerized valve electric drive (VED) for the specific equipment — systems of arc welding are considered by a melting electrode of modern level.

The main requirements to VED, in particular for realization of pulse giving of an electrode wire are defined. Are offered a calculation procedure and VED synthesis with necessary structures of feedback and demanded characteristics.

Results of pilot studies of the executed development are given in the range of the reproduced frequencies necessary for management of transfer of electrode metal with conclusions on use.

Keywords: the mechanized welding, automation, the electric drive, the electric motor, the regulator, control system, efficiency

Основной задачей при разработке механизированной дуговой сварки является повышение производительности труда сварщика за счет автоматизации сварочного оборудования и активного влияния на процессы, происходящие непосредственно в зоне горения дуги. Современный уровень развития микроэлектроники, силовой электроники и электромеханики дает возможность создавать сварочные комплексы, позволяющие осуществлять управляемый капельный перенос электродного металла и, таким образом, существенно улучшить качество сварочного шва и снизить затраты энергии. Работа такого оборудования обычно основана на регулировании процесса сварки за счет управления напряжением и током, в том числе и за счет регулируемой подачи сварочного электрода.

Одним из основных способов управления процессом сварки с воздействием на систему подачи является реализация управляемой импульсной подачи, позволяющей контролировать перенос капель электродного металла [1], что дает возможность управлять характеристиками сварного соединения, а также резко снизить энергетические и материальные затраты.

Для осуществления управляемого капельного переноса электродного металла используется возвратно-поступательное движение электродной проволоки с частотой 10...60 Гц. Для работы механизма подачи на таких частотах требуется использование быстродействующего безредукторного высокомо-

ментного регулируемого электропривода, удовлетворяющего следующим требованиям:

- 1) надежность работы в сложных условиях окружающей среды и непосредственно процесса сварки;
- 2) точность поддержания заданной частоты вращения вала электродвигателя в широком диапазоне регулирования;
- 3) минимальное время переходного процесса разгона и торможения;
- 4) возможность программного управления электроприводом;
- 5) минимальное потребление электроэнергии;
- 6) оптимальные массогабаритные показатели.

На данный момент широко распространенным типом электродвигателя, применяемым в различных системах сварочного оборудования, в том числе в механизмах подачи, является коллекторный двигатель постоянного тока. Однако данный тип двигателя менее надежен по сравнению с бесконтактными машинами ввиду наличия в нем щеточно-коллекторного узла.

Наиболее приемлемым, удовлетворяющим перечисленным выше требованиям является электропривод на базе вентильного электродвигателя с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Такой вентильный электродвигатель обладает повышенной надежностью работы за счет отсутствия скользящих контактов на роторе, а наличие постоянных магнитов позволяет получить высокие показатели энергоэффективности в режимах двигателя и управ-

ляемого рекуперативного торможения. Поэтому разработка и создание быстродействующего регулируемого вентильного электропривода для механизмов импульсной подачи электродной проволоки является актуальной научно-технической задачей.

Вентильный электропривод (ВЭП) включает в себя бесколлекторный электродвигатель со встроенным датчиком частоты вращения и системы управления.

Для обеспечения высоких динамических и статических показателей ВЭП система управления выполнена в виде системы управления подчиненного типа с внутренним контуром тока и внешним контуром скорости, что обеспечивает работу электропривода во всех четырех квадрантах механической характеристики. Исходя из того, что основной режим работы ВЭП при импульсной подаче сварочного электрода повторно-кратковременный, для улучшения энергетических показателей в электроприводе реализовано регулируемое торможение с отдачей запасенной кинетической энергии в источник питания.

Структурная схема ВЭП с обозначениями всех элементов и сигналов представлена на рис. 1.

Тахограмма импульсного движения электродной проволоки в наиболее общем виде, которую должен программно реализовать ВЭП, представлена

на рис. 2. На рис. 3 дана осциллограмма реальной скорости подачи, полученная при использовании в качестве датчика скорости малоинерционного тахогенератора.

Пропорционально-интегральный регулятор скорости (ПИ-РС) получает задание на частоту вращения вала ВЭП n_{ref} от формирователя задания (ФЗ) в соответствии с установленной тахограммой движения. ФЗ выполнен в виде электронного цифрового блока ВЭП и позволяет регулировать следующие параметры тахограммы движения:

- частота следования циклов движения ВЭП от 0 до 60 Гц;
- заданная частота вращения вала ВЭП в цикле движения "вперед" от 15 до 400 мин⁻¹;
- заданная частота вращения вала ВЭП в цикле движения "назад" от 15 до 400 мин⁻¹;
- относительное время движения ВЭП в цикле с заданной частотой вращения "вперед" от 0 до 100 %;
- относительное время движения ВЭП в цикле с заданной частотой вращения "назад" от 0 до 100 %;
- относительное время останова ВЭП в цикле между его движениями "вперед" и "назад".

Для обеспечения широкого диапазона регулирования частоты вращения и точности ее поддержания в ВЭП введена обратная связь от датчика частоты вращения (ДС). Для повышения помехозащищенности и надежности работы ВЭП в непосредственной близости от проведения сварочных работ в качестве ДС использован абсолютный магнитный энкодер. Обратная связь по частоте вращения поступает на вход ПИ-РС, на выходе которого формируется сигнал задания силы тока i_{ref} и задание на направление вращения ротора "Dir" ВЭП.

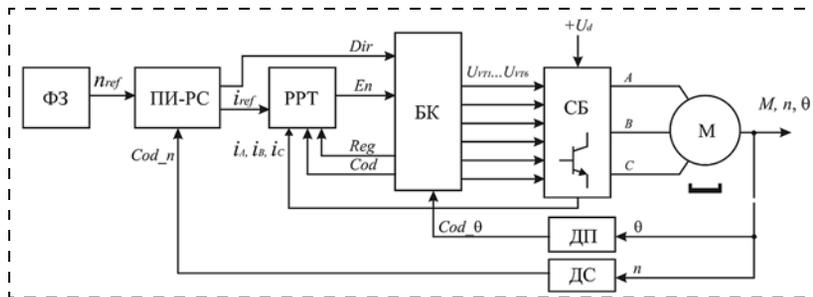


Рис. 1. Структурная схема ВЭП:

ФЗ — формирователь задания частоты вращения электродвигателя; ПИ-РС — пропорционально-интегральный регулятор скорости; РРТ — релейный регулятор тока; БК — блок коммутации транзисторов; СБ — силовой блок; ДП — датчик положения ротора; ДС — датчик частоты вращения; n_{ref} — заданная частота вращения электродвигателя; i_{ref} — заданная сила тока фазы электродвигателя; Cod_n — обратная связь (ОС) по частоте вращения электродвигателя; Cod_θ — ОС по положению ротора электродвигателя; i_A, i_B, i_C — ОС по току фаз электродвигателя; Cod — код положения ротора электродвигателя; Reg — код режима работы электродвигателя; Dir — код направления вращения вала электродвигателя; En — разрешение включения транзистора СБ; A, B, C — фазы электродвигателя; M, n, θ — момент, частота вращения и угловое положение ротора электродвигателя; U_d — напряжение питания СБ электропривода

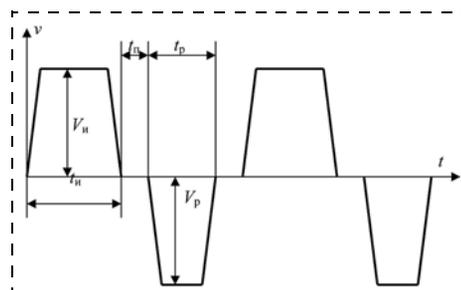


Рис. 2. Тахограмма импульсной подачи электродной проволоки: t_n — длительность импульса; t_p — длительность паузы; t_p — длительность реверса; V_n — скорость в импульсе; V_p — скорость в реверсе

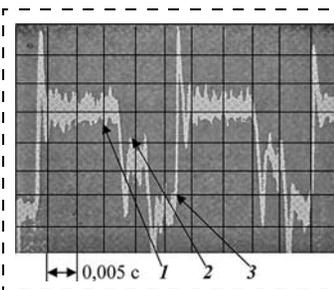


Рис. 3. Осциллограмма скорости импульсной подачи: 1 — импульс; 2 — пауза; 3 — реверс

Для увеличения быстродействия ВЭП контур тока выполнен на базе релейного регулятора с изменяемой зоной регулирования силы тока Δi (рис. 4), что позволяет регулировать частоту и амплитуду пульсаций силы тока фаз электродвигателя для обеспечения заданного электромагнитного момента электродвигателя. При этом частота регулирования силы тока фаз находится в пределах 4...20 кГц.

Контур тока состоит из релейного регулятора тока (РРТ), блока коммутации транзисторов (БК) и силового блока (СБ) с индивидуальными датчиками тока фаз электродвигателя. На вход РРТ поступает сигнал задания силы тока i_{ref} с регулятора скорости и сигналы обратных связей по силам тока фаз i_A, i_B, i_C . Управление регулятором силы тока осуществляется с помощью сигналов кода рабочей фазы "Cod" и режима работы ВЭП "Reg". С помощью этих сигналов управления РРТ обрабатывает заданное значение силы тока фазы в двигательном либо тормозном ре-

жиме работы ВЭП с максимальным быстродействием.

Функциональная схема РРТ показана на рис. 5.

Заданная сила тока i_{ref} подается на формирователь зоны регулирования силы тока фазы (Δ), где разделяется по уровню на два сигнала i_{ref1} и i_{ref2} , разность которых определяет зону регулирования. Внутренние сигналы задания силы тока поступают на входы сумматоров релейных элементов РЭ1 и РЭ2, где сравниваются с сигналом обратной связи по силе тока фазы i_{cf} . Коммутатор тока фаз (КТФ) поочередно переключает сигналы с датчиков силы тока фаз i_A, i_B, i_C на отрицательные входы сумматоров релейных элементов по сигналу кода рабочей фазы "Cod". Логические сигналы с выходов РЭ1 и РЭ2 поступают на блок логики (БЛ), где исходя из режима работы ВЭП (двигательный или тормозной), который задается сигналом "Reg", формируется сигнал разрешения работы "En".

Сигнал разрешения работы силового транзистора "En" с выхода

РРТ поступает на вход БК, где по сигналу положения ротора электродвигателя "Cod_θ", поступающего с датчика положения (ДП), и заданному направлению вращения "Dir" определяются коммутируемые транзисторы СБ. Транзисторы СБ подключают фазы электродвигателя А, В, С к источнику постоянного тока с напряжением U_d . В СБ реализована мостовая трехфазная схема с шестью силовыми транзисторами. Для уменьшения потерь в СБ применены полевые транзисторы с малым сопротивлением канала.

Расчет модели ВЭП выполнен по упрощенной структурной схеме, приведенной на рис. 6, на которой вентильный электродвигатель представлен моделью машины постоянного тока с независимым возбуждением.

На рис. 7 показан внешний вид экспериментального образца разработанного ВЭП.

Электропривод поддерживает заданную частоту вращения с точностью до $\pm 3\%$, что, с учетом достаточно высоких требований к точности подачи электродной проволоки и неизбежных погрешностей в узле передачи движения вала электродвигателя на электродную проволоку, с запасом удовлетворяет требованиям современных систем сварочного оборудования.

Семейство рабочих характеристик, полученных при экспериментальных исследованиях при задании частот вращения 100, 200, 300 и 400 мин⁻¹ и напряжении питания 24В, представлено на рис. 8–10.

На основании полученных характеристик можно определить предельные тяговые характеристики

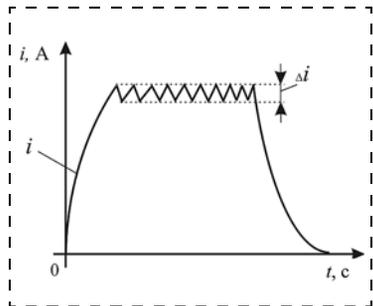


Рис. 4. Работа релейного регулятора тока

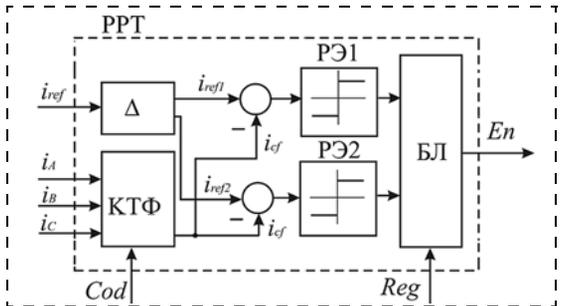


Рис. 5. Функциональная схема РРТ: Δ — формирователь зоны регулирования тока фазы; КТФ — коммутатор тока фазы; РЭ1, РЭ2 — релейные элементы; БЛ — блок логики

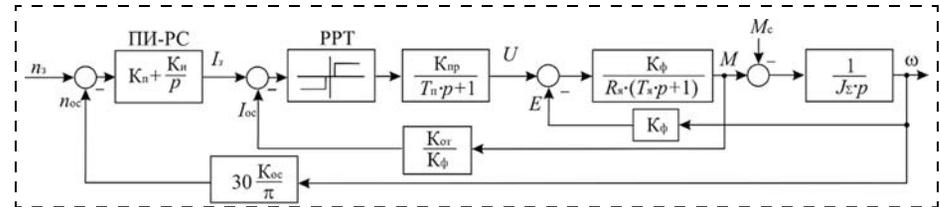


Рис. 6. Расчетная структурная схема ВЭП: n_3 — задание частоты вращения; n_{OC} — ОС по скорости; I_3 — задание тока; I_{OC} — ОС по току; K_{Π} — пропорциональный коэффициент ПИ регулятора; $K_{\text{И}}$ — интегральный коэффициент ПИ регулятора; $K_{\text{пр}}$ — коэффициент передачи преобразователя; U — выходное напряжение преобразователя; E — ЭДС вращения электродвигателя; K_{OT} — коэффициент ОС по току; K_{OC} — коэффициент ОС по скорости; K_{ϕ} — конструктивный коэффициент электродвигателя; $T_{\text{п}}$ — постоянная времени преобразователя; R_s — линейное активное сопротивление электродвигателя в нагретом состоянии; T_s — постоянная времени фазы электродвигателя; J_s — момент инерции, приведенный к валу электродвигателя; M — электромагнитный момент электродвигателя; M_c — момент сопротивления на валу электродвигателя; p — оператор Лапласа

ВЭП и возможности его эффективного применения в системах сварочного оборудования.

Рассмотрим работу электропривода в режимах импульсной подачи электрода в соответствии с рис. 2 в двух режимах при изменении частоты следования импульсов $f = 10 \dots 60$ Гц.

Режим № 1: время движения "вперед" с частотой вращения 100 мин⁻¹ составляет 0,6 времени цикла, остальное время — пауза, в течение которой вал электропривода неподвижен.

Режим № 2: время движения "вперед" с частотой вращения 100 мин⁻¹ составляет 0,4 времени цикла, после чего следует движение "назад" с частотой вращения 50 мин⁻¹ в течение 0,2 времени цикла, остальное время — пауза.

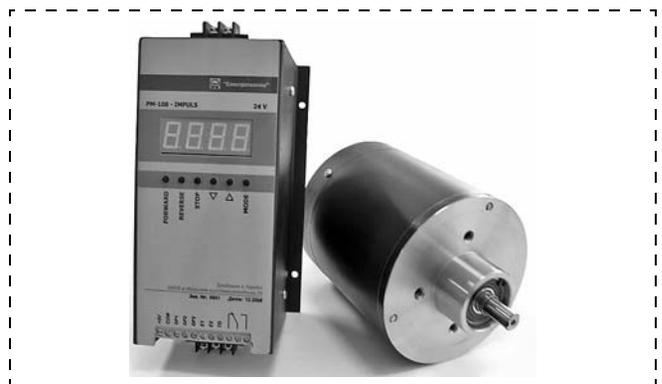


Рис. 7. Экспериментальный образец ВЭП для системы подачи сварочного оборудования

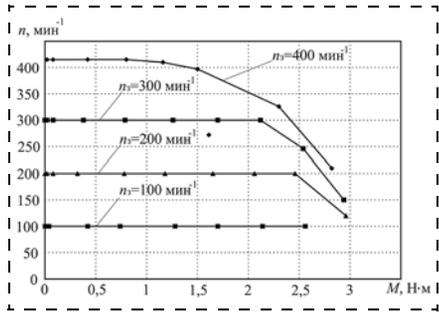


Рис. 8. Зависимость частоты вращения вала электродвигателя от момента на валу

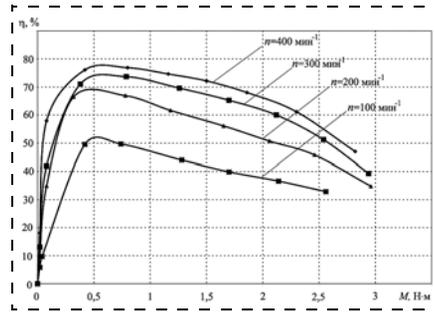


Рис. 9. Зависимость КПД электродвигателя от момента на валу

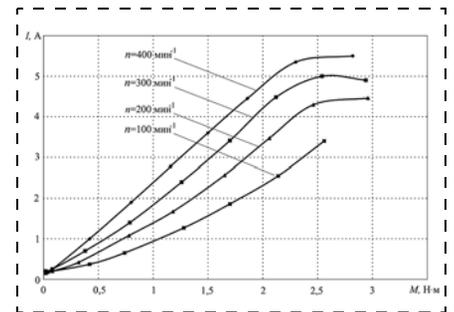


Рис. 10. Зависимость силы тока электродвигателя от момента на валу

Средняя частота вращения вала электропривода при импульсном изменении задания определяется выражением

$$n_{cp} = \gamma_B n_B - \gamma_H n_H,$$

где γ_B, γ_H — относительное время работы электропривода "вперед" и "назад" за период следования импульса задания, соответственно; n_B, n_H — заданные частоты вращения вала электропривода "вперед" и "назад".

Для режимов 1 и 2 расчетные средние частоты вращения будут равны $n_{cp1} = 60 \text{ мин}^{-1}$, $n_{cp2} = 30 \text{ мин}^{-1}$. При диаметре подающего ролика 20 мм средние линейные скорости перемещения сварочного электрода будут равны $V_{cp1} = 226 \text{ м/ч}$, $V_{cp2} = 113,1 \text{ м/ч}$.

Испытания электропривода проводили при импульсной подаче электродной проволоки в режимах 1 и 2 при частотах импульсов управления $f = 10, 20, 30, 40, 50, 60 \text{ Гц}$. Результаты испытаний ВЭП приведены в табл. 1, 2.

В табл. 1, 2 приняты следующие обозначения: f — частота следования импульсов управления электроприводом; n_{cp} — средняя частота вращения вала электродвигателя; V_{cp} — средняя линейная скорость подачи электрода при диаметре подающего ролика 20 мм; δ — погрешность обработки электроприводом заданной частоты вращения.

Из приведенных данных видно, что с увеличением частоты следования импульсов погрешность обработки ВЭП заданной частоты вращения увеличивается, что объясняется увеличением относительного времени переходных процессов пуска—торможения в цикле работы электропривода.

Разработанный ВЭП позволяет осуществлять импульсную подачу сварочного электрода с частотой следования импульсов до 60 Гц.

Таблица 1

Режим 1

$f, \text{ Гц}$	$n_{cp1}, \text{ мин}^{-1}$	$V_{cp1}, \text{ м/ч}$	$\delta, \%$
10	60,33	227,4	0,6
20	60,30	227,3	0,6
30	59,58	224,5	0,7
40	59,10	222,6	1,5
50	59,31	223,5	1,1
60	58,62	220,9	2,3

Таблица 2

Режим 2

$f, \text{ Гц}$	$n_{cp2}, \text{ мин}^{-1}$	$V_{cp2}, \text{ м/ч}$	$\delta, \%$
10	30,07	113,3	0,17
20	30,14	113,6	0,44
30	30,01	113,1	0
40	30,00	113,0	0,08
50	29,81	112,3	0,7
60	29,59	111,5	1,4

Особенности расчета параметров системы регулирования ВЭП для оборудования механизированной сварки

Расчет позволяет определить коэффициенты настройки регулятора скорости и коэффициентов обратных связей по току и скорости. Для расчета используется упрощенная структурная схема ВЭП, приведенная на рис. 6, на которой вентильный электродвигатель представлен моделью машины постоянного тока с независимым возбуждением, что позволяет применить стандартные методы анализа линейных систем регулирования. При этом приняты следующие допущения:

- частота коммутации силовых транзисторов преобразователя ВЭП находится в пределах 4...20 кГц, а полоса пропускания контура скорости лежит в пределах 200 Гц. Соотношение этих частот позволяет пренебречь переходными процессами коммутации фазных токов и представить преобразователь непрерывным линейным апериодическим звеном с постоянной времени $T_{п}$. Постоянная времени преобразователя определяется как $T_{п} = \frac{1}{f_c}$, где f_c — усредненное значение частоты коммутации силовых транзисторов;
- магнитный поток, создаваемый высококоэрцитивными магнитами на роторе вентильного двигателя, не изменяется под действием "реакции якоря", что позволяет применить в расчетах конструктивный коэффициент машины постоянного тока $K_{\phi} = \frac{E}{\omega}$, где ω — угловая частота вращения ротора, с^{-1} ; E — ЭДС вращения вентильного электродвигателя.

Структурная схема на рис. 6 содержит аналоговую и цифровую части. Аналоговый контур тока выполнен на базе релейного регулятора, что, как известно, позволяет компенсировать влияние фазной индуктивности и ЭДС на качество регулирования в замкнутых по скорости системах подчиненного управления [2, 3]. Для упрощения аппаратной части преобразователя ВЭП, а также для улучшения его характеристик ПИ регулятор скорости реализован программно с использованием DSP процессора TMS320.

Расчет коэффициентов регулирования сначала проводится для системы с аналоговым (непрерыв-

ным) ПИ регулятором, а затем рассчитываются параметры дискретного (цифрового) ПИ регулятора. Система уравнений, описывающая переходные процессы в схеме на рис. 6, имеет вид

$$\begin{cases} M - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}; \\ I_я = \frac{(U - E)}{R_я(T_я p + 1)}; \\ U = \frac{(I_3 - I_{OC})K_{PT}K_{PP}}{T_п p + 1}; \\ M = I_я K_\Phi; \\ I_3 = (n_3 - n_{OC}) \frac{K_п T_{PC} p + 1}{T_{PC} p}, \end{cases}$$

где K_{PT} — коэффициент передачи релейного регулятора тока; $T_{PC} = \frac{1}{K_{и}}$ — постоянная времени ПИ регулятора.

Для исследования устойчивости системы используется передаточная функция контура тока при неограниченном увеличении коэффициента усиления $K_{PT} = \infty$:

$$H_{KT}(p) = \frac{1}{J_\Sigma p} \left(\frac{I_3}{K_{OT} K_\Phi} - M_c \right).$$

С учетом этого передаточная функция системы имеет вид

$$H(p) = \frac{(K_п T_{PC} p + 1)n_3 - p T_{PC} K_{OT} K_\Phi M_c}{p^2 T_{PC} J_\Sigma K_{OT} K_\Phi + p K_п T_{PC} K_{OC} + K_{OC}}.$$

Из приведенного выражения видно, что рассмотренная система с релейным регулятором тока и ПИ регулятором скорости позволяет получить астатизм по возмущению и астатизм второго порядка по управлению. Характер переходного процесса в системе определяется корнями характеристического уравнения, полученного из передаточной функции. Для обеспечения наибольшего быстродействия настройка коэффициентов ПИ регулятора скорости проводится на симметричный оптимум.

Переход от непрерывного ПИ регулятора к дискретному подразумевает, что изменение входного значения регулятора в пределах интервала дискретизации (обсчета) является незначительным. Поэтому при полосе пропускания контура скорости порядка 200 Гц для получения необходимого качества регулирования частоту обсчета регулятора необходимо принимать не менее 1...2 кГц.

При реализации дискретного ПИ регулятора использована методика построения схемы, предложенная в работе [4]. Передаточная функция дискретного ПИ-регулятора в виде разностного уравнения имеет вид:

$$I_3 = I_{3-1} + K_п(n_3 - n_{OC}) - K_п(n_3 - n_{OC})_{-1} + \frac{T}{T_{PC}}(n_3 - n_{OC}),$$

где I_{3-1} и $(n_3 - n_{OC})_{-1}$ — выход регулятора и разность задания и сигнала ОС по скорости на предыдущем такте обсчета регулятора; T — период обсчета регулятора.

Таким образом, полученные значения коэффициентов регулирования непрерывного ПИ регулятора могут быть использованы при настройке его дискретного аналога с учетом погрешности, определяемой периодом обсчета регулятора T , и погрешности, вносимой квантованием данных ОС по скорости.

Период квантования данных ОС по скорости определяется параметрами используемого энкодера и требованиями к качеству регулирования (к диапазону и точности поддержания заданной частоты вращения). Для разработанной системы с абсолютным магнитным энкодером AS5040 частота квантования данных по скорости составляет 750 Гц.

В настоящее время на основании выполненной работы по созданию вышеописанного ВЭП разработан ряд механизмов подачи электродной проволоки к полуавтоматам различного назначения для дуговой сварки электродными проволоками сплошного сечения. Такие механизмы носят все признаки мехатронной системы.

Выводы

1. Современные системы оборудования для дуговой сварки плавящимся электродом требуют технических решений, позволяющих существенно улучшить качество процесса, повысить его технико-экономические показатели, что возможно при активном воздействии на процесс плавления и переноса электронного металла за счет применения совершенных конструкций быстродействующих вентильных электроприводов (ВЭП) как мехатронных систем.

2. Получить целенаправленно разработанную для сварочного оборудования конструкцию ВЭП можно, применив методы выбора и настройки систем обратных связей с регуляторами на основе с компьютеризованного регулирования и управления, что обеспечивает необходимый диапазон изменения частоты вращения вала электродвигателя и частотный спектр движения в прямом и обратном направлениях.

3. Выполненная разработка ВЭП позволяет с достаточной точностью воспроизводить импульсное движение электродной проволоки с частотами порядка 60 Гц, что обеспечивает управляемый перенос электродного металла, позволяющий, в свою очередь, управлять процессом дуговой сварки.

Список литературы

1. Патон Б. Е., Лебедев В. А., Пичак В. Г., Полосков С. И., Шавелев Л. Н. Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки // Сварочное производство. 2002. № 2. С. 24–31.
2. Сафонов Ю. М. Электроприводы промышленных роботов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 176 с.
3. Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр "Академия", 2005. 304 с.
4. Анучин А. С. Реализация ПИ — регулятора повышенной точности для TMS320X24XX. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 4 с. URL: <http://www.motorcontrol.ru/piRegTMS320x24xx.pdf>

ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



Главный редактор:
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Ответственный секретарь:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БАРАНОВ Л. А.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ХИМЕНКО В. И.
ЧЕБУРАХИН И. Ф.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю.

Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависимости при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1 53

Шибанов Г. П.

Оптимизация процесса контроля бортовых комплексов оборудования летательных аппаратов. 56

Александровская Л. Н., Борисов В. Г.,

Мазур В. Н., Хлгатян С. В., Ардалионова А. Е.

Параметрические методы оценки соответствия требований к безопасности автоматической посадки самолетов нормам летной годности 62

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, проф., зав. лаб., filaret@pma.ru,

А. Ю. Коноплин, ассистент, kayur-prim@mail.ru,

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Дальневосточный федеральный университет

Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1¹

Описан метод синтеза комбинированной замкнутой автоматической системы стабилизации положения и ориентации подводного аппарата в режиме его зависания вблизи объекта выполнения работ. Инвариантность подводного аппарата к внешним воздействиям, создаваемым работающим подводным манипулятором, обеспечивается с помощью тяг его винтов, пропорциональных указанным внешним воздействиям, вычисляемым в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: подводный аппарат, многозвенный манипулятор, навигационная система, пространственная траектория, система стабилизации

V. F. Filaretov, A. Yu. Konoplin

System of Automatic Stabilization of Underwater Vehicle in Stationkeeping Regime with Working Multilink Manipulator. Part 1

In this paper the synthesis method of combined closed-loop automatic system of underwater vehicle position and orientation stabilization in stationkeeping regime is described. Herewith underwater vehicle invariance to external influences created by working underwater manipulator is provided by tractions of its screws. These tractions are proportional to said external influences calculated in real time scale.

Keywords: underwater vehicle, multilink manipulator, navigation system, spatial trajectory, stabilization system

Введение

При освоении Мирового океана существует проблема качественного выполнения различных технологических операций с помощью подводных аппаратов (ПА), оснащенных многозвенными подводными манипуляторами (ПМ). Во многих случаях эти операции требуются выполнять быстро в режиме зависания ПА вблизи объекта работ, так как время работ часто ограничено, а их стоимость очень высока.

Однако в процессе быстрого перемещения ПМ в водной среде со стороны этого манипулятора возникают значительные силовые и моментные воздействия на ПА, обусловленные не только инерционными и гравитационными силами, но также и силами, определяемыми взаимодействием движущегося ПМ с окружающей вязкой средой [1]. Это приводит к смещению аппарата относительно исходного положения и препятствует качественному выполнению манипуляционных задач. В результате возникает задача автоматической компенсации этих вредных силовых и моментных воздействий на ПА.

В настоящее время уже решены некоторые задачи синтеза системы автоматической стабилизации ПА в режиме его зависания над объектом работ при работающем ПМ. В частности, в работе [2] предложена разомкнутая система компенсации движи-

телями ПА силовых и моментных воздействий со стороны работающего ПМ, основанная на расчете значений этих воздействий в реальном масштабе времени. При этом схема расположения движителей построена таким образом, чтобы обеспечивать формирование главного вектора и главного момента сил компенсации с любой их ориентацией в пространстве. Для расчета указанных векторов используется алгоритм решения обратной задачи динамики (ОЗД) ПМ, предназначенный только для малых чисел Рейнольдса, т. е. для малых скоростей перемещения многозвенника, при которых еще действует принцип суперпозиции силовых воздействий на звенья ПМ со стороны вязкой среды ввиду линейной зависимости этих воздействий от скоростей движения всех звеньев манипулятора.

Однако современные ПМ, устанавливаемые на рабочие ПА, могут перемещаться с высокими скоростями. Для таких ПМ указанный принцип суперпозиции нарушается, и алгоритм, предложенный в работе [2], уже не позволяет правильно вычислять силовые и моментные воздействия на произвольно движущиеся звенья манипулятора. В этом случае для повышения точности вычислений все звенья ПМ целесообразно разбивать на малые элементы [3] и в алгоритме решения ОЗД для всего ПМ вычислять суммарные силовые воздействия со стороны вязкой среды на эти элементы.

Однако ввиду сложности математического описания взаимодействия движущегося ПМ с водной

¹ Выполнение этой работы поддержано грантами РФФИ 13-07-00741_а, 13-08-01344_а, а также программы ДВФУ (соглашение 13-06-0112-м, и проект 12-08-13004-04).

средой вычисления искомых силовых и моментных воздействий на ПА со стороны этого ПМ в некоторых случаях могут осуществляться приближенно. Это может привести к значительному снижению точности стабилизации ПА при использовании разомкнутых систем управления. Для увеличения точности удержания ПА в заданной точке пространства с заданной ориентацией необходимо применять замкнутые по всем линейным и угловым перемещениям аппарата автоматические системы стабилизации, которые могут использовать высокоточные навигационные системы [4, 5], а также бортовые гироскопические приборы.

Таким образом, выполненный анализ существующих систем стабилизации ПА в толще воды показывает, что эта важная для практического использования задача еще далека от завершения и требует поиска новых эффективных путей ее решения.

1. Постановка задачи

В статье ставится задача разработки метода синтеза эффективной комбинированной системы стабилизации положения и ориентации ПА в заданной точке подводного пространства в режиме его зависания над или вблизи объекта работ во время выполнения ПМ различных технологических операций с высокой скоростью.

2. Расчет силовых и моментных воздействий на ПА со стороны быстро перемещающегося ПМ

Поставленную задачу планируется решить в два этапа. На первом предполагается разработать алгоритм расчета силовых и моментных воздействий на ПА со стороны работающего ПМ, а на втором — синтезировать многоканальную следящую систему стабилизации этого ПА в пространстве.

Вначале рассмотрим i -е однородное цилиндрическое звено n -степенного ПМ (см. рисунок), со-

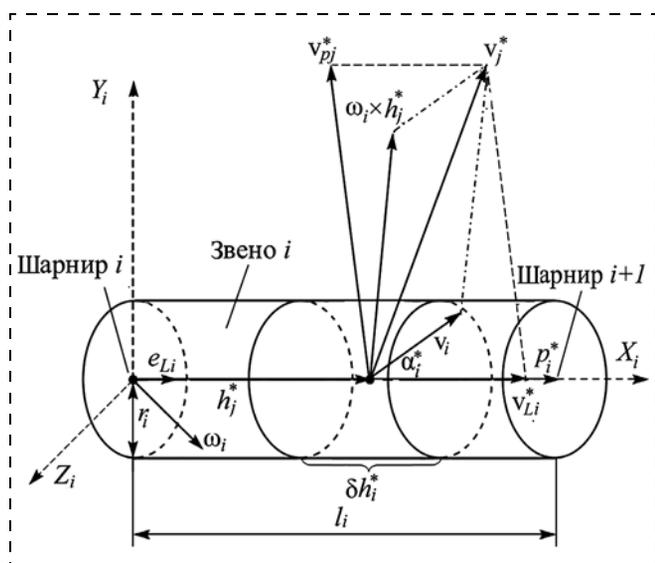


Схема расположения векторов скоростей элементарной части звена i при произвольном пространственном движении ПМ

вершающего сложные движения в водной среде с высокой скоростью ($i = \overline{1, n}$). Очевидно, что в общем случае каждая элементарная часть δh_i^* звена i может иметь различную поперечную скорость движения относительно покоящейся жидкости не только по модулю, но и по направлению. При этом, как указано в работе [1], сила, действующая на эту элементарную часть со стороны вязкой среды, может иметь линейную или квадратичную зависимость от модуля линейной скорости движения этой части. В результате использование подхода, описанного в работе [2] и предполагающего рассмотрение всех звеньев ПМ без их разделения на элементарные части, корректно только при малых скоростях движения ПМ, когда принцип суперпозиции при разделении линейной и угловой скоростей движения этих звеньев на продольные и поперечные составляющие остается справедливым. При высоких скоростях движения ПМ, как уже отмечалось во введении, каждое его звено необходимо обязательно разбивать на N элементарных частей длиной δh_i^* (см. рисунок). При этом значение N определяется длиной соответствующего звена ПМ.

На рисунке введены следующие обозначения: $X_i Y_i Z_i$ — связанная со звеном i правая система координат (СК), построенная на основе подхода Денавита — Хартенберга [6]; $v_i \in R^3$ — вектор линейной скорости движения шарнира i ; $\omega_i \in R^3$ — угловая скорость вращения звена i ; $p_i^* \in R^3$ — вектор, совпадающий с продольной осью звена i , определяющий положение шарнира $(i + 1)$ относительно шарнира i ; $e_{Li} \in R^3$ — единичный вектор, направленный вдоль продольной оси звена i ; $h_j^* \in R^3$ — вектор, определяющий центр масс элементарной части j звена i длиной δh_i^* относительно шарнира i ; $\alpha_i^* = \arccos \frac{v_i p_i^*}{|v_i| |p_i^*|}$ —

угол между векторами v_i и p_i^* ; l_i и r_i — соответственно длина и радиус звена i ; (\times) и (\cdot) — соответственно векторное и скалярное произведения векторов.

Векторы v_i и ω_i могут быть определены с помощью следующих рекуррентных соотношений [6]:

$$v_i = A_i^{i-1} (v_{i-1} + \omega_{i-1} \times p_{i-1}^*), v_1 = v_0, i = \overline{2, n};$$

$$\omega_i = A_i^{i-1} \omega_{i-1} + e_i \cdot \dot{q}_i, \omega_0 = \omega_0^*, i = \overline{1, n},$$

где A_i^{i-1} — матрица перевода векторов из $(i - 1)$ -й в i -ю СК; $e_i = (0 \ 0 \ 1)^T$ — единичный вектор, направленный вдоль оси шарнира i ; $v_0 \in R^3$ — линейная скорость точки крепления ПМ к ПА, $\omega_i^* \in R^3$ — угловая скорость вращения ПА; q_i — обобщенная координата i манипулятора.

Вектор линейной скорости движения центра масс каждого элемента j звена i определяется выражением

$$v_j^* = v_i + \omega_i \times h_j^*, j = \overline{1, N}, \text{ где } h_j^* = \frac{1}{2} (2j - 1) \delta h_i^* e_{Li}$$

Вектор v_j^* разобьем на поперечную $v_{pj}^* \in R^3$ и продольную $v_{Li}^* \in R^3$ составляющие (см. рисунок). При этом вектор v_{Li}^* , являющийся проекцией вектора v_i на вектор p_i^* , одинаков для всех элементарных частей звена i и определяется выражением $v_{Li}^* = |v_i| e_{Li} \cos \alpha_i^*$, а вектор v_{pj}^* каждой элементарной части j может быть определен по формуле $v_{pj}^* = v_j^* - v_{Li}^*$.

В работах [1, 2] указано, что при малых значениях числа Рейнольдса ($Re \leq 10^3$) силовое воздействие со стороны вязкой среды на движущееся цилиндрическое тело линейно зависит от модуля скорости этого движения, а при больших значениях ($10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5$) указанная зависимость является квадратичной. На практике при работе ПМ всегда выполняется неравенство $Re < 2 \cdot 10^5$.

Используя общую формулу для определения чисел Re [1]: $Re = \frac{\rho v d}{\eta}$ (где ρ и η — соответственно плотность и вязкость жидкости; v и d — соответственно линейная скорость и характерный размер тела), можно определить эти числа для цилиндрических звеньев ПМ (или их участков), движущихся

параллельно ($Re_{Li} = \frac{\rho v_{Li}^* l_i}{\eta}$) и перпендикулярно

($Re_{pj} = \frac{2 \rho v_{pj}^* r_i}{\eta}$) их продольным осям со скоростями

v_{Li}^* и v_{pj}^* соответственно.

Для $Re \leq 10^3$ составляющая силы вязкого трения, направленная вдоль продольной оси звена ПМ, определяется по формуле $F_{RLi} = k_{Li} \eta v_{Li}^*$, а для $10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5$ — по формуле $F_{RLi} = \frac{1}{2} \rho k_{Li} s_i v_{Li}^{*2}$, где k_{Li} — экспериментально определяемый коэффициент; $s_i = \pi r_i^2$ — площадь основания цилиндрического звена i .

Поперечная сила вязкого трения, действующая на соответствующую элементарную часть j звена i , при $Re \leq 10^3$ определяется по формуле $F_{Rpj} = k_i^* \eta v_{pj}^*$, а при выполнении неравенства $10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5$ — по формуле $F_{Rpj} = \rho k_i^* r_i \delta h_i^* v_{pj}^{*2}$, где k_i^* — экспериментально определяемый коэффициент.

Суммарную силу $F_{Rpi} = \sum_{j=1}^N F_{Rpj}$, действующую на

звено i , можно определить как сумму сил, приложенных к каждой элементарной части j этого звена. Так как точка приложения силы F_{Rpi} к звену i неизвестна, то момент M_{Rpi} этой силы в шарнире i

лучше определить суммой $M_{Rpi} = \sum_{j=1}^N M_{Rpj}$ моментов

$M_{Rpj} = h_j^* \times F_{Rpj}$, создаваемых силами F_{Rpj} .

Определив силовые и моментные воздействия со стороны вязкой среды на каждое из движущихся звеньев ПМ, можно перейти к составлению алгоритма решения ОЗД, позволяющего определить силовые и моментные воздействия в каждом суставе многозвенника, а в результате — искомые силовые и моментные воздействия на ПА со стороны работающего ПМ.

3. Рекуррентный алгоритм решения ОЗД для ПМ

В основу рекуррентного алгоритма решения ОЗД для многозвенного манипулятора положена хорошо известная двухэтапная схема вычислений. Согласно этой схеме вначале, начиная с первого и кончая последним звеном манипулятора, последовательно по рекуррентным соотношениям вычисляются угловые скорости и ускорения центров масс его звеньев. После этого также по рекуррентным формулам в обратном порядке определяются силы и моменты, действующие во всех его шарнирах.

С учетом полученных выше соотношений алгоритм решения ОЗД для ПМ можно записать в следующем виде:

$$\omega_i = A_i^{i-1} \cdot \omega_{i-1} + e_i \cdot \dot{q}_i \cdot \bar{\sigma}_i, \omega_0 = \omega_0^*, i = \overline{1, n};$$

$$\dot{\omega}_i = A_i^{i-1} \cdot \dot{\omega}_{i-1} + [(A_i^{i-1} \cdot \omega_{i-1}) \times e_i \cdot \dot{q}_i + e_i \cdot \ddot{q}_i] \cdot \bar{\sigma}_i, \dot{\omega}_0 = \dot{\omega}_0^*, i = \overline{1, n};$$

$$\ddot{P}_i' = A_i^{i-1} \cdot (\ddot{P}_{i-1}' + \delta_{i-1} \cdot p_{i-1}^*) + (2 \dot{q}_i \cdot \omega_i \times e_i + \ddot{q}_i \cdot e_i) \cdot \sigma_i, \ddot{P}_0' = P_0^*, i = \overline{1, n};$$

$$\ddot{r}_{mi}' = \ddot{P}_i' + \delta_i \cdot r_i^*, i = \overline{1, n};$$

$$v_i = A_i^{i-1} \cdot (v_{i-1} + \omega_{i-1} \times p_{i-1}^*), v_1 = v_0, i = \overline{2, n};$$

$$v_{Ai} = v_i + \omega_i \times r_i^*, \psi_i = \arccos \frac{V_{Ai} \cdot p_i^*}{|V_{Ai}| \cdot |p_i^*|}, i = \overline{1, n};$$

$$\alpha_i^* = \arccos \frac{V_i \cdot p_i^*}{|V_i| |p_i^*|}, \beta_i^* = \arccos \frac{\omega_i \cdot p_i^*}{|\omega_i| \cdot |p_i^*|}, i = \overline{1, n};$$

$$r_{pi} = r_i^* + K_{Ai} \cdot v_{Ai}, i = \overline{1, n};$$

$$v_j^* = v_i + \omega_i \times h_j^*, \omega_{Li} = |\omega_i| e_{Li} \cos \beta_i^*, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, N};$$

$$v_{Li}^* = |v_i| e_{Li} \cos \alpha_i^*, v_{pj}^* = v_j^* - v_{Li}^*, i = \overline{2, n}, j = \overline{1, N};$$

$$Re_{Li} = \frac{\rho v_{Li}^* l_i}{\eta}, i = \overline{n, 1};$$

$$\text{если } Re \leq 10^3, \text{ то } F_{RLi} = k_{Li} \eta v_{Li}^*, i = \overline{n, 1};$$

$$\text{если } Re > 10^3, \text{ то } F_{RLi} = \frac{1}{2} \rho k_{Li} s_i v_{Li}^{*2}, i = \overline{n, 1};$$

$$Re_{pj} = \frac{2 \rho v_{pj}^* r_i}{\eta}, i = \overline{n, 1}; j = \overline{1, N};$$

$$\text{если } Re \leq 10^3, \text{ то } F_{Rpj} = k_i^* \eta v_{pj}^*, i = \overline{n, 1}, j = \overline{1, N};$$

если $Re > 10^3$, то $F_{Rpi} = \frac{1}{2} \rho k_i^* d_j v_{pj}^{*2}$, $i = \overline{n, 1}$, $j = \overline{1, N}$;

$$F_{Rpi} = \sum_{j=1}^N F_{Rpi}, i = \overline{n, 1}, j = \overline{1, N};$$

$$M_{Rpi} = h_j^* \times F_{Rpi}, j = \overline{1, N};$$

$$M_{Rpi} = \sum_{j=1}^N M_{Rpi}, i = \overline{n, 1}, j = \overline{1, N};$$

$$M_{Li} = k_{Li}^* \eta r_i \omega_{Li}, i = \overline{n, 1};$$

$$F_i = A_i^{i+1} \cdot F_{i+1} + (m_i + \Pi_{mi}) \cdot \ddot{r}_{mi} + F_{RLi} + F_{Rpi}$$

$$F_{n+1} = 0, i = \overline{n, 1};$$

$$M_i = A_i^{i+1} \cdot M_{i+1} + p_i^* \times (A_i^{i+1} \cdot F_{i+1}) + r_i^* \times (m_i \cdot \ddot{r}_{mi}) + r_{pi} \times (\Pi_{mi} \cdot \ddot{r}_{mi}) + (\tau_i + T_i) \cdot \dot{\omega}_i + \omega_i \times ((\tau_i + T_i) \cdot \omega_i) + M_{Rpi} + M_{Li}, M_{n+1} = 0, i = \overline{n, 1};$$

$$\text{где } \delta_i = \begin{bmatrix} -(\omega_{i(2)}^2 + \omega_{i(3)}^2) & \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(2)} - \dot{\omega}_{i(3)} & \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(2)} \\ \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(2)} + \dot{\omega}_{i(3)} & -(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(3)}^2) & \omega_{i(2)} \cdot \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(1)} \\ \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(2)} & \omega_{i(2)} \cdot \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(1)} & -(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(2)}^2) \end{bmatrix}$$

(нижний индекс в элементах квадратных скобок указывает на их номер в соответствующих векторах); $v_{Ai} \in R^3$ — линейная скорость центра величины звена i ; $\sigma_i = 1$, если шарнир i поступательный и $\sigma_i = 0$, если он вращательный ($\bar{\sigma}_i = 1 - \sigma_i$); m_i — масса звена i ; $\dot{\omega}_i \in R^3$ — его угловое ускорение; $\omega_{Li} \in R^3$ — составляющая угловой скорости ω_i , параллельная продольной оси звена i ; Π_{mi} — присоединенные к звену i массы жидкости; $\ddot{r}_{mi} \in R^3$ — линейное ускорение центра масс звена i ; $r_{pi} \in R^3$ — вектор, задающий положение центра массы Π_{mi} относительно шарнира i ; $r_i^* \in R^3$ — вектор, задающий положение центра

масс звена относительно шарнира i ; k_{Li}^* — экспериментально определяемый коэффициент; K_{Ai} — параметр, зависящий от $|v_{Ai}|$ и угла ψ_i ; $\tau_i \in R^{3 \times 3}$ — тензор инерции звена i относительно его центра масс; $T_i \in R^{3 \times 3}$ — тензор инерции массы жидкости, присоединенной к звену i ; $F_i, M_i \in R^3$ — сила и момент этой силы, действующие в шарнире i , соответственно; $P_0^* = -g + \ddot{P}_{ПА}$, если центры масс всех звеньев ПМ не совпадают с их центрами величины (центрами водоизмещения); $P_0^* = g \left(\frac{w_i}{m_i} - 1 \right) + \ddot{P}_{ПА}$, если центры масс всех звеньев совпадают с их центрами величины; $\ddot{P}_{ПА} \in R^3$ — линейное ускорение основания ПМ; g — ускорение свободного падения тела; w_i — масса жидкости, вытесненной звеном.

Таким образом, рассмотренный выше рекуррентный алгоритм решения ОЗД для ПМ позволяет вычислить силу F_1 и момент M_1 , с которыми движущийся ПМ в СК $X_1 Y_1 Z_1$ воздействует на ПА в точке его крепления к этому аппарату. Указанные сила и момент должны быть скомпенсированы соответствующими упорами движителей ПА.

Список литературы

1. **Квафе Ф.** Взаимодействие робота с внешней средой. М.: Мир, 1985. 285 с.
2. **Филаретов В. Ф., Алексеев Ю. К., Лебедев А. В.** Системы управления подводными роботами / Под ред. В. Ф. Филаретова. М.: Круглый год, 2001. 288 с.
3. **Филаретов В. Ф., Русских А. А.** Особенности формирования сил и моментов, действующих на звено манипулятора, совершающего произвольные движения в водной среде // Вестник ДВГТУ. 2009. № 2. С. 91—97. URL: <http://science.fentu.ru/vestnik/2009/3/osob/>
4. **Horgan J., Toal D.** Computer vision applications in the navigation of unmanned underwater vehicles // Underwater Vehicles. In-Tech. 2009. 582 p.
5. **Hinüber E.** New approaches in high-performance navigation solutions for AUVs and ROVs / iMAR. URL: www.imar-navigation.de, 2010.
6. **Фу К., Гонсалес Р., Ли К.** Робототехника: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 624 с.

УДК 629.7

Г. П. Шибанов, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., grshibanov@mail.ru,

Государственный летно-испытательный центр им. В. П. Чкалова

Оптимизация процесса контроля бортовых комплексов оборудования летательных аппаратов

Рассматривается процедура оптимизации периодов контроля и выполнения профилактических работ применительно к бортовым комплексам оборудования летательных аппаратов. Процедура оптимизации реализуется из условия достижения минимума удельных потерь эффективности функционирования комплекса, под которыми понимается уменьшение показателя эффективности в единицу времени эксплуатации из-за неоптимальной периодичности контроля и профилактики. В качестве критериев оптимизации используются математическое ожидание удельных и полных потерь эффективности функционирования комплекса и математическое ожидание времени проведения профилактических работ.

Ключевые слова: оптимизация, критерии, контроль, профилактика, эффективность функционирования, бортовой комплекс оборудования, летательный аппарат

Checkout Onboard Complex of Equipment of Flying Device Optimization

This article consideration the problem optimization of period control and preventive maintenance onboard complex of equipment of flying device. To use criterions of optimization: minimum of specific loss effectiveness of performance; mathematical waiting specific and full loss of effectiveness of performance; mathematical waiting of preventive maintenance time.

Keywords: optimization, criterions, check, control, preventive maintenance, effectiveness of performance, onboard complex of equipment, flying device

Обычно бортовой комплекс оборудования (БКО) летательного аппарата (ЛА) посредством входящей в его состав бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) периодически подвергается программному контролю и последующему восстановлению с периодом T_{KB} , причем факт нарушения его работоспособности или причины снижения эффективности функционирования обнаруживаются только при проведении планового контроля или при применении комплекса по назначению.

При выпуске в полет ЛА, в БКО которого имеются неисправности или неисправности в котором проявились в полете, возможно снижение эффективности его функционирования, а необходимость выполнения последующих работ по устранению неисправностей ведет, как правило, к снижению боеготовности ЛА военного назначения или снижению экономических показателей авиакомпании, эксплуатирующей данный ЛА гражданского назначения.

На практике за счет оптимизации периодов контроля и профилактики при заданных уровнях надежности БКО снижение числовых значений показателей эффективности их функционирования можно свести к некоторому допустимому уровню (минимуму).

Задача выбора оптимальных периодов контроля и профилактики состоит в определении такого их значения, при котором можно ожидать наименьшее снижение показателей эффективности функционирования контролируемого БКО [1].

В качестве эквивалентов снижения показателей эффективности функционирования БКО примем соответствующие потери эффективности в единицу времени эксплуатации из-за неоптимальной периодичности выполнения проверок и профилактических работ. В этом случае в качестве критерия оптимизации периодичности контроля удобно принять математическое ожидание удельных потерь, т. е. потерь в единицу времени эксплуатации. Аналитически данный критерий исходя из анализа физических основ процесса эксплуатации БКО может быть представлен в виде

$$M(T_{KB}) = \frac{\mu_1 \left[T_{KB} F(T_{KB}) - \int_0^{T_{KB}} F(t) dt \right] + \mu_2 [\theta_{PC} + (\theta_{HP} - \theta_{PC}) F(T_{KB})] + \mu_3 - \mu_4 \varphi}{T_{KB} + \theta_{PC} + (\theta_{HP} - \theta_{PC}) F(T_{KB})},$$

где μ_1 — потери за единицу времени при неработоспособном бортовом комплексе оборудования; μ_2 — потери за единицу времени при контроле бортового комплекса оборудования и восстановлении его работоспособности; μ_3 — увеличение числового значения критерия оптимизации, связанное с выполнением технического обслуживания; μ_4 — уменьшение числового значения критерия оптимизации за единицу времени при работоспособном БКО; $F(t)$ — интегральный закон распределения времени работы бортового комплекса оборудования без нарушения его работоспособности; θ_{PC} , θ_{HP} — среднее время, затрачиваемое на выполнение профилактических работ, если обслуживаемый комплекс, соответственно, работоспособен и потерял работоспособность или работоспособность его снизилась ниже некоторого минимально допустимого уровня; φ — услов-

ное обозначение выражения $\left[T_{KB} - \int_0^{T_{KB}} F(t) dt \right]$.

Для обеспечения удобства последующих вычислений числовые значения коэффициентов μ_1 , μ_2 , μ_3 , μ_4 целесообразно представить в нормализованном виде с изменением их в пределах от 0 до 1. Применительно к каждому конкретному комплексу их следует выбирать с учетом:

- числа функциональных связей и резервных систем, весового вклада каждой связи и системы в обеспечение заданного уровня эффективности функционирования;
- вероятности появления необходимости применения комплекса по его функциональному назначению в периоды технического обслуживания, контроля и восстановления;
- вероятности отыскания и устранения причин нарушения работоспособности комплекса за время, не превышающее допустимого значения, исходя из конкретных показателей его технологичности и ремонтпригодности, а для ЛА военного назначения — и с учетом тактической обстановки.

Такого типа выбор осуществляется по соответствующим методикам [1].

Следует отметить, что по предлагаемой методологии оптимизации оптимальному значению периода контроля и восстановления работоспособности БКО ЛА (T_{KB}) должен соответствовать минимум функции удельных потерь $M(T_{KB})$ при любых законах распределения $F(t)$. В общем случае оптималь-

ный межпроверочный период определяется как корень уравнения

$$\frac{dM(T_{\text{КВ}})}{dT_{\text{КВ}}} = 0, \quad (1)$$

которое может быть развернуто и представлено в виде

$$\begin{aligned} & \int_0^{T_{\text{КВ}}} [1 + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})F(T_{\text{КВ}})]tdF(t) + \\ & + \{(\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})[F(T_{\text{КВ}}) - T_{\text{КВ}}F(T_{\text{КВ}})] + \theta_{\text{РС}}\}F(T_{\text{КВ}}) = \\ & = \frac{\mu_3}{\mu_1} [1 + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})F(T_{\text{КВ}})] + \frac{\mu_2}{\mu_1} \{\theta_{\text{РС}} + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}}) \times \\ & \times [F(T_{\text{КВ}}) - T_{\text{КВ}}F(T_{\text{КВ}})]\} + \frac{\mu_4}{\mu_1} \{\theta_{\text{РС}} + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}}) \times \\ & \times F(T_{\text{КВ}})\} [1 - F(T_{\text{КВ}})] + [1 + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})F(T_{\text{КВ}})] \times \\ & \times \int_0^{T_{\text{КВ}}} F(t)dt - T_{\text{КВ}}[F(T_{\text{КВ}}) + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})F(T_{\text{КВ}})] \} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \mu_1 = & \int_0^{T_{\text{КВ}}} (t + T_{\text{ПФ}})dF(t) = \mu_2 T_{\text{ПФ}} + \mu_3 + \\ & + \mu_4 \{1 - F(T_{\text{КВ}})T_{\text{ПФ}} - T_{\text{КВ}}F(T_{\text{КВ}}) + \int_0^{T_{\text{КВ}}} F(t)dt\}, \end{aligned}$$

где $T_{\text{ПФ}}$ — математическое ожидание времени проведения профилактических работ, определяемое из выражения

$$\begin{aligned} T_{\text{ПФ}} = & \theta_{\text{РС}} \int_0^{\infty} dF(t) + \theta_{\text{НР}} \int_0^{T_{\text{КВ}}} dF(t) = \\ & = \theta_{\text{РС}} + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})F(T_{\text{КВ}}). \end{aligned}$$

При наличии в уравнении (1) нескольких корней выбирается тот из них, для которого $M(T_{\text{КВ}})$ имеет абсолютный минимум.

Если, например, принять $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, где λ — интенсивность нарушений работоспособности БКО, являющаяся на практике возрастающей функцией времени, то получим

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\lambda} [1 + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})\lambda e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}] [1 - (1 + \lambda T_{\text{КВ}})e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}] \times \\ & \times [\theta_{\text{НР}} - (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})(1 + \lambda T_{\text{КВ}})e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}] (1 - e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}) = \\ & = \frac{\mu_3}{\mu_1} [1 + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})\lambda e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}] + \\ & + \frac{\mu_2}{\mu_1} [\theta_{\text{НР}} - (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})(1 + \lambda T_{\text{КВ}})e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\mu_4}{\mu_1} \{[\theta_{\text{НР}} - (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}] e^{-\lambda T_{\text{КВ}}} + \\ & + [1 + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})\lambda e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}] [T_{\text{КВ}} - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T_{\text{КВ}}})] - \\ & - T_{\text{КВ}}[1 - e^{-\lambda T_{\text{КВ}}} + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{РС}})\lambda e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}] \} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\lambda} [1 - (1 + \lambda T_{\text{КВ}})e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}] + T_{\text{ПФ}}(1 + e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}) = \\ & = \frac{1}{\mu_1} [\mu_3 + \mu_2 T_{\text{ПФ}}] + \frac{\mu_4}{\mu_1} \times \\ & \times \left[(T_{\text{КВ}} + T_{\text{ПФ}})e^{-\lambda T_{\text{КВ}}} - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}) \right]. \end{aligned}$$

Ограничиваясь первыми тремя членами в разложении $e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}$, что в большинстве случаев на практике оказывается достаточным, последние уравнения можно существенно упростить и представить их в виде

$$\begin{aligned} & T_{\text{КВ}}^2 + 2T_{\text{КВ}}\theta_{\text{РС}} - \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{\mu_3 + (\mu_2 + \mu_4)\theta_{\text{РС}}}{\mu_1 + \mu_4} = 0 \\ \text{или} & T_{\text{КВ}}^2 + 2T_{\text{КВ}}T_{\text{ПФ}} - \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{\mu_3 + (\mu_2 + \mu_4)T_{\text{ПФ}}}{\mu_1 + \mu_4} = 0. \end{aligned}$$

Тогда оптимальное значение $T_{\text{КВ}}$ будет

$$T_{\text{КВ}}^{\text{опт}} = -T_{\text{ПФ}} + \sqrt{T_{\text{ПФ}}^2 + \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{\mu_3(\mu_2 + \mu_4)T_{\text{ПФ}}}{\mu_1 + \mu_4}}.$$

Для определения минимальных потерь в выражение функции потерь необходимо подставить полученное оптимальное значение межпроверочного периода.

Если поток нарушений работоспособности проверяемого БКО стационарен, то полученные соотношения справедливы для любого цикла технического обслуживания. При этом оптимальное значение $T_{\text{КВ}}$ одинаково для каждого из этих циклов.

При нестационарном потоке нарушений работоспособности оптимальное значение $T_{\text{КВ}}$ зависит от номера цикла профилактических работ. Оптимальное значение k -го ($k = 1, 2, \dots$) межпроверочного периода $T_{\text{КВ}}^{(k)}$ можно определять последовательно, идя от цикла к циклу. Циклы $T_{\text{КВ}}^{(k)}$ разделены промежутком времени $T_{\text{ПФ}}$, затрачиваемым на проведение профилактических работ. Задача оптимизации может решаться на основе критерия минимума полных потерь за время эксплуатации рассматри-

ваемого БКО. В этом случае функция потерь имеет следующий вид:

$$M_{\Pi}(T_{\text{КВ}}) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \mu_1 \int_{t_{k-1}}^{t_k} (t_k - t) dF(t) + k\mu_3 + \mu_2 \left[\theta_{\text{PC}} \int_{t_k}^{\infty} dF(t) + \theta_{\text{НР}} \int_{t_{k-1}}^{n_k} dF(t) \right] - \mu_4 \int_{t_{k-1}}^{t_k} [1 - F(t)] dt \right\}.$$

Последовательность чисел $\{t_k\}$, определяющих оптимальные моменты начала профилактических работ, находится из уравнения $\frac{\partial M_{\Pi}(T_{\text{КВ}})}{\partial t_k} = 0$,

$k = 1, 2, \dots$, решением которого является рекуррентное соотношение

$$t_{k+1} - t_k = \frac{F(t_k) - F(t_{k-1})}{F(t_k)} - \frac{\mu_2}{\mu_1} \theta_{\text{PC}}.$$

Момент начала первой проверки может быть определен из равенства

$$\mu_2 \theta_{\text{PC}} = \mu_1 \int_0^{t_1} (t_1 - t) dF(t).$$

При распределении $F(t)$, соответствующем возрастающей функции интенсивности $\lambda(t)$ нарушения работоспособности проверяемого БКО, значение $t_{1\text{опт}}$ может быть уточнено путем процедуры последовательных приближений [2]. В соответствии с данной процедурой на основании полученного значения $t_1 > 0$ вычисляются значения $t_k, k = 2, 3, \dots$; если значение t_1 выбрано так, что $t_1 > t_{1\text{опт}}$, то для некоторых значений k имеет место соотношение $\Delta_k = (t_{k+1} - t_k) > \Delta_{k-1} = t_k - t_{k-1}$, а когда $t_1 < t_{1\text{опт}}$, то соотношение $k\Delta_k < 0$. При известном $T_{\text{пф}}$ следует принять $\theta_{\text{PC}} = T_{\text{пф}}$.

Полученные результаты при минимизации общих потерь легко распространить на случай, когда поток нарушений работоспособности проверяемого комплекса стационарен. Если $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, то оптимальное значение $T_{\text{КВ}}$ удовлетворяет уравнению

$$T_{\text{КВ}} = \frac{1}{\lambda e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}} (1 - e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}) - \frac{\mu_2}{\mu_1} \theta_{\text{PC}},$$

$$M(T_{\text{КВ}}) = \frac{\mu_1 \int_0^{T_{\text{КВ}}} \left[F_1(x) - \int_0^x F(x-y) dF_1(y) \right] dx + \mu_2 \theta_{\text{PC}} + \mu_3 + \mu_2 (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{PC}}) F(T_{\text{КВ}}) - \psi}{T_{\text{КВ}} \int_0^{T_{\text{КВ}}} \int_0^x F(x-y) dF_1(y) dx + \theta_{\text{PC}} + (\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{PC}}) F(T_{\text{КВ}})},$$

где ψ — условное обозначение выражения $\mu_4 \int_0^{T_{\text{КВ}}} [1 - F_1(x)] dx$.

приближенное решение которого имеет вид

$$T_{\text{КВ}} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \theta_{\text{PC}} + \sqrt{2 \frac{\mu_2}{\mu_1} \cdot \frac{\theta_{\text{PC}}}{\lambda} + \frac{\mu_2}{\mu_1} \theta_{\text{PC}}^2} \approx \sqrt{\frac{2\mu_2 \theta_{\text{PC}}}{\mu_1 \lambda}}.$$

Из анализа полученных результатов следует, что для экспоненциального закона распределения времени между нарушениями работоспособности проверяемого БКО оптимальное значение периода контроля и восстановления работоспособности

равно $T_{\text{КВ}} = \sqrt{\frac{2\chi}{\lambda}}$, где χ — мера потерь, вид которой

определяется минимизируемой функцией. Так, если минимизируются удельные потери, то $\chi =$

$$= \frac{\mu_3 + (\mu_2 + \mu_1) \theta_{\text{PC}}}{\mu_1 + \mu_4}, \text{ а если общие потери, то } \chi = \frac{\mu_2}{\mu_1} \theta_{\text{PC}}.$$

В БКО обычно реализуются не только упомянутый в начале статьи программный, но также аппаратный и смешанный (программно-аппаратный) методы самоконтроля. При этом возникшее нарушение работоспособности может проявиться раньше назначенного календарного момента начала профилактического контроля. В идеальном случае к диагностическому контролю и восстановлению целесообразно приступать в момент обнаружения такого нарушения работоспособности комплекса или его отдельных систем, устройств, блоков. Поэтому оптимизацию периодичности контроля необходимо рассмотреть также для случая, когда упомянутые операции начинаются либо в момент установления факта нарушения работоспособности при самоконтроле, либо в заранее назначенный календарный момент времени с периодичностью $T_{\text{КВ}}$.

Предположим, что в процессе самоконтроля обнаруживается любое отклонение характеристик контролируемого БКО, приводящее к нарушению его работоспособности. Кроме того, допустим, что интервал времени проявления или обнаружения нарушения работоспособности случаен, его длительность описывается интегральным законом распределения $F_1(x)$, а длительность интервала времени, на котором нарушение работоспособности комплекса не проявляется, — законом $F_1(y)$. Тогда функция удельных потерь будет иметь вид

Оптимальное значение $T_{\text{КВ}}$ может быть получено в виде результата решения уравнения $\frac{dM(T_{\text{КВ}})}{dT_{\text{КВ}}} = 0$, а максимальное значение коэффициента готовности — на основе решения уравнения

$$\frac{\theta_{\text{PC}}}{\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{PC}}} = -F(T_{\text{КВ}}) + \lambda(T_{\text{КВ}}) \int_0^{T_{\text{КВ}}} [1 - F_1(x)] dx -$$

$$- \frac{1}{\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{PC}}} \left\{ T_{\text{КВ}} - \int_0^{T_{\text{КВ}}} \int_0^x F(x-y) dF_1(y) dx - \right.$$

$$- \frac{\int_0^{T_{\text{КВ}}} [1 - F_1(x)] dx}{1 - F(T_{\text{КВ}})} \left[1 - \int_0^{T_{\text{КВ}}} F(T_{\text{КВ}} - x) dF_1(x) + \right.$$

$$\left. \left. + (\theta_{\text{НР}} + \theta_{\text{PC}}) \int_0^{T_{\text{КВ}}} F(T_{\text{КВ}} - x) dF_1(x) \right] \right\}.$$

Если нарушение работоспособности обнаруживается сразу при его возникновении, то $F_1(x) \equiv 1$. В этом случае оптимальное значение $T_{\text{КВ}}$, при котором удельные потери минимальны, может быть найдено на основе решения уравнения

$$\frac{\theta_{\text{PC}}}{\theta_{\text{НР}} - \theta_{\text{PC}}} = -F(T_{\text{КВ}}) + \lambda(T_{\text{КВ}}) \int_0^{T_{\text{КВ}}} [1 - F_1(x)] dx.$$

При $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ правая часть уравнения обращается в константу, которая не зависит от $T_{\text{КВ}}$, и уравнение не будет иметь корней. Из этого следует, что для такого БКО периодический контроль нецелесообразен, а его обслуживание должно проводиться только при обнаружении нарушения работоспособности. Следовательно, рассматриваемая стратегия контроля и восстановления работоспособности целесообразна только для БКО, интенсивность нарушения работоспособности которых является возрастающей функцией времени.

Для общего случая, когда диагностический контроль и восстановление БКО проводятся только после установления факта нарушения его работоспособности, удельные потери и коэффициент готовности $K_{\text{Г}}$ определяются выражениями

$$M(T_{\text{КВ}}) = \frac{\mu_1 T_1 + \mu_2 \theta_{\text{НР}} + \mu_3 - \mu_4 T_{\text{СР}}}{T_{\text{СР}} + T_1 + \theta_{\text{НР}}};$$

$$K_{\text{Г}} = \frac{T_{\text{СР}}}{T_{\text{СР}} + T_1 + \theta_{\text{НР}}},$$

где $T_1 = \int_0^{\infty} [1 - F_1(x)] dx$ — среднее время установления факта нарушения работоспособности; $T_{\text{СР}} =$

$= \int_0^{\infty} [1 - F(x)] dx$ — среднее время между нарушениями работоспособности проверяемого БКО.

Если в конце межпроверочного периода вероятность работоспособности проверяемого БКО должна быть больше некоторого наперед заданного значения $P_{\text{Д}}$ или вероятность появления нарушений работоспособности должна быть не больше $P_{\text{НР}}$, то соответственно $F(T_{\text{КВ}}) \leq (1 - P_{\text{Д}})$, $F(T_{\text{КВ}}) \leq P_{\text{НР}}$.

Для экспоненциального закона распределения получаем

$$e^{-\lambda T_{\text{КВ}}} \geq P_{\text{Д}} \text{ и}$$

$$(1 - e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}) \leq P_{\text{Д}} \text{ или } T_{\text{КВ}} \leq \frac{|\ln P_{\text{Д}}|}{\lambda}.$$

При наложении ограничений на допустимые средние значения этих вероятностей за межпроверочный период необходимые соотношения принимают вид

$$\frac{\int_0^{T_{\text{КВ}}} [1 - F(t)] dt}{T_{\text{КВ}}} \geq P_{\text{СР.Д}}, \quad \frac{\int_0^{T_{\text{КВ}}} F(t) dt}{T_{\text{КВ}}} \leq P_{\text{СР.НР}},$$

которые для экспоненциального закона распределения преобразуются в выражения $\frac{1 - e^{-\lambda T_{\text{КВ}}}}{\lambda T_{\text{КВ}}} \geq P_{\text{СР.Д}}$,

$$\frac{\lambda T_{\text{КВ}} + (e^{-\lambda T_{\text{КВ}}} - 1)}{\lambda T_{\text{КВ}}} \leq P_{\text{СР.НР}}.$$

Последние выражения приводятся к уравнению

$$T_{\text{КВ}} + \frac{1}{\lambda P_{\text{СР.Д}}} e^{-\lambda T_{\text{КВ}}} - \frac{1}{\lambda P_{\text{СР.НР}}} = 0,$$

приближенное решение которого имеет вид

$$T_{\text{КВ}} = \frac{3 \pm \sqrt{9 - 24 P_{\text{СР.НР}}}}{2\lambda} \approx \frac{2 P_{\text{СР.НР}}}{\lambda} = \frac{2(1 - P_{\text{СР.Д}})}{\lambda}.$$

Целесообразность использования для установления межпроверочного периода того или иного критерия определяется спецификой требований, предъявляемых к конкретному контролируемому БКО.

Накопленный опыт эксплуатации БКО ЛА показывает, что межпроверочный период $T_{\text{КВ}}$, оптимизируемый из условия минимума общих потерь, удельных потерь и максимума коэффициента готовности, имеет приемлемое значение для практических целей. Тем не менее, как правило, имеет место неравенство $P(T_{\text{КВ}}) < P_{\text{Д}}$. В ряде случаев для БКО должно выполняться условие $P(T_{\text{КВ}}) \geq P_{\text{Д}}$ при принятом или оптимальном значении $T_{\text{КВ}}$. Такие условия могут быть удовлетворены за счет проведения в межпроверочный период частичного контроля систем и устройств БКО и, при необходимости, восстановления их, что наиболее характерно для ЛА военного назначения. Таким образом, практика ставит задачу определения периодичности частичного контроля и его полноты при установленных значениях $T_{\text{КВ}}$ и $P_{\text{Д}}$.

Предположим, что время частичного контроля и восстановления систем и устройств БКО ЛА мало. При этом частичный контроль реализуется посредством входящей в БКО бортовой ЦВМ в моменты времени $t_k, k = 1, 2, \dots$. Тогда, если принять, что вероятность $P_0(t)$ безотказной работы БКО в период $0 \leq t \leq t_1$ изменяется по закону $P_0(t) = e^{-\lambda t}$ и что в момент $t = t_1$ с некоторой вероятностью α неработоспособный БКО может быть принят за работоспособный, то для момента времени $t = t_1$ можно

записать $P_0(t_1) = e^{-\alpha \lambda t_1} e^{-(1-\alpha)\lambda t_1}$, где последний множитель справа определяет значение увеличения вероятности функционирования БКО без нарушения его работоспособности за счет частичного контроля и восстановления (при необходимости).

Поэтому $P_1(t_1) = e^{-\alpha \lambda t_1}$, а в общем случае для любого k -го момента контроля при $t_k \leq t \leq t_{k+1}$

$$P_k(t) = e^{-\lambda t} e^{(1-\alpha)\lambda t_k}, k = 1, 2, \dots$$

Наиболее удобно, когда частичный контроль осуществляется с постоянной периодичностью $T_{чк}$.

Тогда при $t_k \leq t \leq t_{k+1}$ $P_k(t) = e^{-\lambda t} e^{-(1-\alpha)\lambda_k T_{чк}}$.

В конце межпроверочного периода, т. е. при $t = T_{кв} = (k+1)T_{чк}$ должно быть $P_k(t_{k+1}) \geq P_{д}$ или $e^{-(k+1)\lambda T_{чк}} e^{-(1-\alpha)\lambda_k T_{чк}} \geq P_{д}$. Это условие будет выполнено, если

$$\alpha \leq -\frac{\ln P_{д} e^{-\lambda T_{чк}}}{\lambda_k T_{чк}} \approx \frac{1 - P_{д} e^{-\lambda T_{чк}}}{\lambda(T_{кв} - T_{чк})}$$

Периодичность частичного контроля определяется соотношением $T_{чк} \leq -\frac{\ln P_{д} e^{-\alpha \lambda T_{кв}}}{\lambda(1-\alpha)}$, а межре-

ламентный период $T_{кв} \leq \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{P_{д}} e^{-(1-\alpha)\lambda_k T_{чк}}$.

В процессе работы БКО частичный контроль его систем, устройств и блоков осуществляется, как правило, одним из наиболее распространенных программных методов — тестовым методом проверки.

Предположим, что тестовым методом частичного контроля охвачена часть систем, устройств и блоков БКО, характеризующая интенсивностью $\lambda_{тк}$ нарушений их работоспособности. Тогда полнота тестового контроля оценивается соотношением $v_{тк} = \frac{\lambda_{тк}}{\lambda}$.

При использовании для контроля БКО аппаратного метода проверки нарушение его работоспособности обнаруживается практически без задержки, и бортовая автоматика своевременно выключает БКО или отдельные его элементы, сигнализируя одновременно о необходимости их восстановления.

Пусть аппаратным контролем охвачены системы, устройства и блоки БКО, интенсивность нарушения работоспособности которых равна $\lambda_{ак}$. Тогда

полнота аппаратного частичного контроля может быть оценена величиной $v_{ак} = \frac{\lambda_{ак}}{\lambda}$.

В общем случае, когда применяются одновременно частичный тестовый и аппаратный контроль систем, устройств и блоков БКО в межпроверочный период, выражения для оценки вероятности пребывания его в работоспособном состоянии имеют вид

$$P_0(t) = e^{-\lambda t} e^{-v_{ак}\lambda t} \text{ при } 0 \leq t \leq t_1;$$

$$P_k(t) = e^{-\lambda t} e^{-v_{ак}\lambda t} e^{-v_{тк}\lambda t} \text{ при } t_k \leq t \leq t_{k+1}, k = 1, 2, \dots$$

При постоянной периодичности частичного тестового контроля в конце периода $T_{кв}$, т. е. при $t_{k+1} = T_{кв} = (k+1)T_{чк}$, должно выполняться условие $P_k(t_{k+1}) \geq P_{д}$. Данное условие будет выполнено, если

$$v_{тк} \geq 1 - v_{ак} + \frac{\ln P_{д} e^{\lambda T_{чк}} e^{-v_{ак}\lambda T_{чк}}}{\lambda(T_{кв} - T_{чк})}$$

$$\text{или } v_{ак} \geq \frac{1}{\lambda T_{кв}} \ln P_{д} e^{-\lambda T_{кв}} e^{-v_{тк}\lambda(T_{кв} - T_{чк})}$$

При принятых значениях полноты контроля $v_{тк}$ и $v_{ак}$ периодичность частичного тестового контроля будет определяться неравенством

$$T_{чк} \leq -\frac{1}{\lambda v_{тк}} \ln P_{д} e^{-\lambda T_{кв}(1-v_{ак}-v_{тк})}$$

В заключение следует отметить следующее:

1. Применительно к стационарному потоку нарушений работоспособности БКО оптимальное значение периодов его контроля и восстановления одинаково для каждого цикла технического обслуживания, и оптимизацию указанных периодов целесообразно осуществлять на основе минимизации удельных потерь эффективности БКО.

При нестационарном потоке нарушений работоспособности оптимальное значение межпроверочного периода зависит от номера цикла профилактических работ и в качестве критерия оптимизации целесообразно использовать минимум полных потерь эффективности функционирования БКО за все время его эксплуатации.

2. Дальнейшую работу по практическому внедрению предложенного подхода к оптимизации периодов контроля и профилактики целесообразно сосредоточить на отработке инженерной методики определения числовых значений коэффициентов $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ и методических основ учета влияния возможных сбоев БЦВМ на периодичность контроля и профилактики БКО.

Список литературы

1. **Контроль функционирования больших систем** / Под ред. Г. П. Шибанова. М.: Машиностроение, 1977. 360 с.
2. **Майоров А. В., Москатов Г. К., Шибанов Г. П.** Безопасность функционирования автоматизированных объектов. М.: Машиностроение, 1988. 263 с.

Л. Н. Александровская, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,
В. Г. Борисов, канд. техн. наук, вед. инженер, **В. Н. Мазур**, канд. техн. наук, нач. сектора,
С. В. Хлгатян, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **А. Е. Ардалионова**, инженер, aomiea@aviapribor.ru,
 ОАО "Московский институт электромеханики и автоматики"

Параметрические методы оценки соответствия требований к безопасности автоматической посадки самолетов нормам летной годности

Рассмотрены параметрические методы оценки рисков, которые являются более экономными по сравнению с непараметрическими, однако требуют решения задачи подбора распределений, аппроксимирующих экспериментальные данные. Обсуждается проблема подбора аппроксимирующего распределения по экспериментальным данным, которая является одной из самых сложных задач математической статистики. Представлены результаты исследований по подбору аппроксимирующих распределений и даны рекомендации по рациональному их использованию.

Ключевые слова: система автоматической посадки самолета, требования к безопасности, толерантный интервал

L. N. Aleksandrovskaya, **V. G. Borisov**, V. N. Mazur, S. V. Khlgatyan, A. E. Ardalionova

Parametric Methods for Assessing Compliance with the Safety Requirements of Automatic Landing Aircraft Airworthiness

Contrary to nonparametric risks measurement methods, which do not demand the knowledge of probabilities distribution laws and need to obtain large volume samplings, the parametrical methods are more economic, however they demand to solve the distributions approximating experimental data fitting problem. The fitting of approximating distribution for experimental data is one of the challenges of mathematical statistics. Thus, the necessity of not observable distributions "tails" approximation and the impossibility of the chosen measurements statistical model experimental verification cause additional difficulties. The article presents the results of studies on approximating distributions fitting and gives out recommendations on their efficient use.

Keywords: aircraft of automatic landing system, safety requirements, tolerance interval

Рассмотренные в работе [1] методы относятся к группе непараметрических методов, не требующих оценки таких характеристик распределений, как математическое ожидание, дисперсия, показатели асимметрии и эксцесса. Общим для этой группы методов является невозможность их экстраполяции на ненаблюдаемые хвосты распределений, т. е. необходимый объем выборки должен обеспечить заданную долю распределения, находящегося между минимальным и максимальным значениями случайной величины в этой выборке. В результате получаем, что для оценки вероятности $R = 0,999999$ необходимо провести по крайней мере $n = 1\,000\,000$ статистических испытаний. В то же время при оценке характеристик распределений оказывается уже достаточно провести $n = 30\,000$ испытаний, чтобы пренебречь статистическим разбросом оценок параметров распределений. Поэтому представляет интерес задача подбора аппроксимирующего распределения, основанного на использовании полученных при статистическом моделировании эмпирических оценок мате-

матического ожидания $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, дисперсии

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \text{ показателя асимметрии } \sqrt{\beta_1} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{S^3} \text{ и эксцесса } \beta_2 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{S^4} \quad [2].$$

Метод моментов

Простейшим параметрическим методом, привлечем внимание авторов, является метод моментов, заключающийся в выборе типа распределения и определении его параметров приравниванием теоретических и эмпирических моментов [3]. Основная привлекательность такого подхода заключается в стабильности эмпирических моментов при больших объемах n статистического моделирования и возможности, тем самым, прогнозирования любых, сколь угодно высоких вероятностей выполнения требований. Табл. 1 иллюстрирует такую стабильность на примере дальности касания основных стоек шасси самолета взлетно-посадочной полосы при его посадке.

Семейство распределений Пирсона и Джонсона можно оценивать как обобщение метода моментов,

при которых помимо параметров распределений определяется в зависимости от значений показателей асимметрии β_1 и эксцесса β_2 и тип распределения. При этом в семейство распределений Пирсона как частные случаи входят все типовые распределения [4–6]:

- I и II типы — β -распределение;
- III тип — γ -распределение;
- IV тип — специальное распределение, редко используемое в практике;
- V тип — обратное γ -распределение с теми же параметрами, что и логарифмически нормальное распределение;
- VI тип — обратное β -распределение;
- VII тип — t -распределение Стьюдента (частный случай — нормальное распределение).

Семейство распределений Джонсона представляет собой три типа преобразований в зависимости от показателей асимметрии β_1 и эксцесса β_2 произвольного распределения в стандартное нормальное распределение ($m = 0$; $\sigma = 1$). Все три типа представляют собой различные логарифмические преобразования [3–5].

Рассмотрим возможность применения этих классических аппроксимаций к оценке сверхмалых вероятностей рисков при автоматической посадке самолета АН-148 по IIIа категории.

В табл. 2 приведены требования к характеристикам посадки, определяющим ее безопасность.

В табл. 3 приведены оценки математического ожидания m , среднеквадратического отклонения σ , показателей асимметрии β_1 и эксцесса β_2 , полученные по 300 000 реализаций статистического моделирования автоматической посадки самолета.

Анализ углов крена, сноса и бокового отклонения показал возможность описания их законов распределения VII типом семейства распределений Пирсона (распределением Стьюдента).

Табличные значения квантилей распределения Пирсона t_p ограничены вероятностью $p = 0,99999$. Для больших значений p можно использовать приближенную формулу Корниша—Фишера

$$t_p(v) \approx U_p \left\{ 1 + \frac{1}{4v} (1 + U_p^2) + \frac{1}{96v^2} (3 + 16U_p^2 + 5U_p^4) \right\},$$

где U_p — квантиль стандартного нормального распределения (для $p = 0,99999$ $U_p = 4,75$; для $p = 0,9999999$ $U_p = 5,6$) [7].

В табл. 4 приведены результаты расчетов прогнозных оценок x характеристик посадки.

Для оценки точности аппроксимации используем максимальные значения исследуемых параметров x_{\max} и их верхние 95-процентные доверительные границы x_B , полученные при нормальной аппроксимации [7] при объеме выборки $n = 10^6$ (табл. 5).

На рис. 1–3 приведены теоретические и эмпирические законы распределения соответствующих характеристик, показывающие значительную "переоценку" аппроксимирующих функций, что обеспечивает гарантию проведенных оценок соответ-

Таблица 1

Основные статистические характеристики функции распределения

Объем выборки n	Математическое ожидание m , м	Среднеквадратическое отклонение σ , м	Асимметрия β_1	Эксцесс β_2
300 000	400,713	40,374	0,02	4,72
600 000	400,72	40,317	0,02	4,73
1 000 000	400,689	40,339	0,022	4,65

Таблица 2

Требования к характеристикам посадки

Характеристики посадки	Допуск на характеристику	Предельно допустимый риск
Дальность касания	60...823 м	10^{-6}
Вертикальная скорость при касании	$[-3,5]$ м/с	10^{-6}
Угол крена	$\pm 7^\circ$	10^{-8}
Угол сноса	$\pm 9^\circ$	10^{-6}
Боковое отклонение	± 21 м	10^{-6}

Таблица 3

Статистические характеристики, полученные в результате статистического моделирования автоматической посадки самолета

Характеристики посадки	m	σ	β_1	β_2
Дальность касания	400,713 м	40,374 м	0,02	4,72
Вертикальная скорость при касании	1,198 м/с	0,265 м/с	0,863	5,213
Угол крена	$-0,002^\circ$	$0,6997^\circ$	0,000081	3,796
Угол сноса	$0,001^\circ$	$0,823^\circ$	0,000004	3,642
Боковое отклонение	0,002 м	1,106 м	0,000049	4,144

Таблица 4

Параметры распределения Пирсона и прогнозные оценки характеристик посадки

Характеристики посадки	Параметры распределения Пирсона					Прогнозные оценки	
	q	l	v	$t_{0,999999}^1$	$t_{0,99999999}^2$	x_1	x_2
Угол крена	6,25	$3,09\sigma$	12	8,08	11,55	$\pm 5,05^\circ$	$\pm 7,2^\circ$
Угол сноса	7,2	$2,77\sigma$	13	7,76	—	$\pm 4,64^\circ$	—
Боковое отклонение	5,13	$2,98\sigma$	9	7,9	—	$\pm 8,73$ м	—

Таблица 5

Результаты оценки точности аппроксимации

Характеристика посадки	$x_{\max}(\text{экс.})$	x_B	$x_{\text{оценки}}$
Угол крена, $^\circ$	4,8	5,0	5,05
Угол сноса, $^\circ$	4,5	4,7	4,64
Боковое отклонение, м	8,1	8,7	8,73

вия предъявляемым требованиям к безопасности автоматической посадки.

Обозначения на рис. 1–3: 1 — экспериментальное распределение, 2 — распределение Пирсона.

Распределение вертикальной скорости самолета в момент касания взлетно-посадочной полосы существенно несимметрично. Его параметры близки к параметрам логарифмически нормального распределения (тип S_L семейства Джонсона):

$$Z = \gamma + \eta \ln x,$$

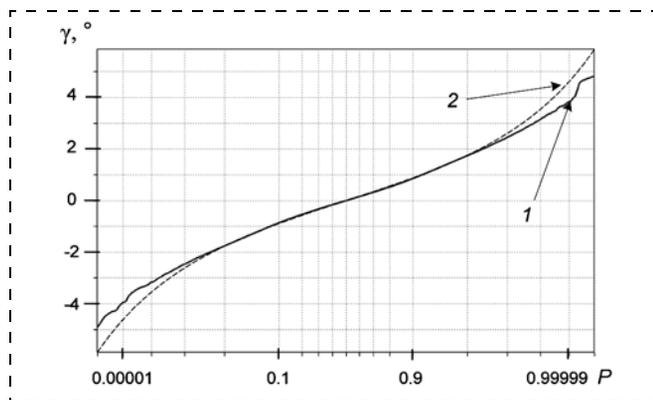


Рис. 1. Теоретический и эмпирический законы распределения угла крена γ

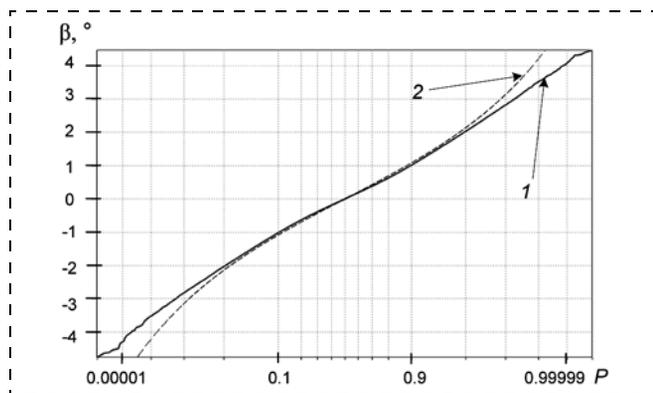


Рис. 2. Теоретический и эмпирический законы распределения угла сноса β

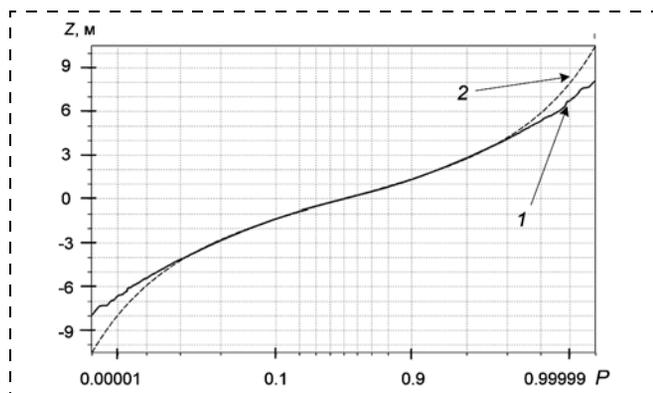


Рис. 3. Теоретический и эмпирический законы распределения бокового отклонения Z

где Z — стандартная нормально распределенная случайная величина $Z \sim N(m = 0, \sigma^2 = 1)$.

Параметры распределения Джонсона определяются из условий

$$M[Z] = \gamma + \eta M[\ln x] = 0;$$

$$D[Z] = \eta^2 D[\ln x] = 1.$$

В свою очередь

$$M[\ln x] \approx \ln m;$$

$$D[\ln x] \approx \left(\frac{\partial \ln x}{\partial x} \right)_{x=m}^2 \cdot \sigma^2(x) = \frac{\sigma^2(x)}{m^2},$$

откуда получим

$$\gamma = -\ln m; \eta^2 = 1 / \frac{\sigma^2(x)}{m^2}; Z = \ln \frac{x}{m} / \frac{\sigma}{m}.$$

При условии $Z = 4,75$ для $p = 0,999999$ и $\frac{\sigma}{m} = 0,22$ $x_{\max} = 3,42$ м/с.

При $n = 10^6$ экспериментальное значение $x_{\max} = 3,48$ м/с.

Более точной аппроксимацией закона распределения вертикальной скорости является тип S_U распределения Джонсона:

$$Z = \gamma + \eta [\ln(y + \sqrt{y^2 + 1})],$$

где параметры γ и η определяются в зависимости от $\sqrt{\beta_1}$ и β_2 по таблицам [5], а $y = \frac{x-m}{\lambda}$, причем параметры сдвига и масштаба μ и λ отличны от m и σ .

С точностью до дискретности таблиц имеем $\gamma = -0,882$; $\eta = 2,038$, отсюда аналогично предыдущему расчету получим

$$M[\ln(y + \sqrt{y^2 + 1})] = \ln(\bar{y} + \sqrt{\bar{y}^2 + 1}) = -\frac{\gamma}{\eta} = 0,433,$$

$$\text{где } \bar{y} = \frac{\bar{x} - \mu}{\lambda};$$

$$D[\ln(y + \sqrt{y^2 + 1})] = \frac{1}{\lambda^2} \cdot \frac{1}{y^2 + 1} \cdot \sigma^2(x) = \frac{1}{\eta^2} = 0,24,$$

$$\text{откуда } \lambda = 0,334; \mu = 0,85.$$

Для $Z = 4,75$ получим $x = 3,48$ м/с, т. е. имеем полное совпадение с экспериментальным значением.

Таким образом, результаты, полученные как S_L , так и S_U аппроксимацией, практически совпали.

В заключение попытаемся применить классические методы к аппроксимации дальности касания. Не приводя выкладок, аналогичных предыдущим, сформулируем следующие результаты. Пренебрегая асимметрией дальности и применяя аппроксимацию VII типом семейства Пирсона получаем значительную "недооценку" максимальной дальности ($D_{\max} = 762$ м, $D_{\min} = 39$ м), а используя S_U распределение Джонсона — значительную "переоценку" ($D_{\max} = 887$ м, $D_{\min} = 25$ м) (сравним с экспериментальными данными при $n = 10^6$: $D_{\max} = 815$ м, $D_{\min} = 124$ м).

Результаты расчетов по использованию распределения Парето

n_{yc}	C_0 , м	\bar{x} , м	S , м	$\bar{\alpha}$	ΔV	D_{max} расчет.	D_{max} эксперт.	ΔD	$D_{прогноз}$ на 0,999999
20	800	828,765	22,87	37,25	0,01	867,96	869,9	1,94	896,9
141	730	763,44	31,6	25,2	<0,01	890	869,9	20,1	932

Поэтому аппроксимация закона распределения дальности касания требует дополнительного исследования.

Новые методы аппроксимации функций распределения вероятностей

Построение распределений из семейств Пирсона и Джонсона основано на использовании первых четырех моментов и позволяет получить соответствующие плотности вероятностей, при этом последующее интегрирование, необходимое для определения толерантного интервала, связано с некоторыми вычислительными трудностями.

Все перечисленные методы позволяют аппроксимировать экспериментальные данные такими математическими выражениями, которые распространяются на ненаблюдаемые значения случайных величин. Возможны и другие подходы, при которых "подгонка" осуществляется только в том интервале, где расположены результаты измерений, при этом используются некоторые "усеченные" распределения.

В статье проведено исследование трех возможных подходов к решению задачи аппроксимации эмпирических законов распределения вероятностей характеристик автоматической посадки самолетов [8]:

- использование распределения Парето, описывающего распределение вероятности случайных величин, больших (меньших) некоторого значения;
- использование смеси распределений;
- использование сплайн-аппроксимации.

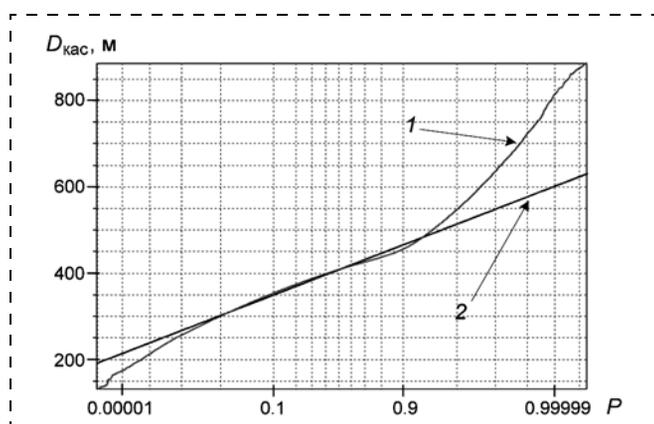


Рис. 4. Функция распределения дальности касания $D_{кас}$ ($N = 2,3 \cdot 10^6$):

1 — экспериментальное распределение; 2 — нормальное распределение

Метод использования распределения Парето

Логическое обоснование данного подхода состоит в следующем. Исходной информацией являются эмпирические функции распределений. Функция нормального закона распределения в соответствующем масштабе¹ представляет собой прямую линию (рис. 4). Поэтому на графиках функций распределения исследуемых характеристик автоматической посадки (на примере дальности касания основной стойкой шасси взлетно-посадочной полосы) видны отклонения от нормальности в хвостах распределений. Анализ функций распределений применен также при моделировании автоматической посадки самолета Боинг 757/767 [9].

В качестве иллюстрации к предложенному подходу приведены результаты аппроксимации правого "хвоста" функции распределения дальности касания на основе использования распределения Парето [8].

В табл. 6 представлены результаты расчетов по использованию распределения Парето, проведенных для промежуточного варианта посадки самолета АН-148 при объеме статистического моделирования $n = 300\,000$.

Помимо статистической погрешности при определении параметра α распределения Парето на результат может также повлиять неточность определения вероятности, соответствующей точке усечения. Для исследования этой погрешности будем использовать метод определения доверительного интервала на выборочный квантиль x_{pi} , приведенный в работе [5].

На основе приведенных в табл. 6 и 7 результатов расчетов можно сделать следующие выводы:

- точность аппроксимации закона распределения дальности касания распределением Парето сильно зависит от объема усечения n_{yc} ;
- при соответствующем выборе n_{yc} погрешность аппроксимации при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$ составляет 11 м;
- увеличение n_{yc} приводит к "переоценке" дальности касания.

¹ В дальнейшем для вычисления вероятности успешного приземления нас будет интересовать поведение функции распределения дальности на правом конце ("хвосте"). Для более детального графического рассмотрения так называемых "хвостов" желательно провести нелинейное растяжение вдоль оси вероятности, т. е. отобразить интервал вероятностей (0,1) в интервал $(-\infty, +\infty)$. Операцию растяжения такого типа можно выполнить многими способами. Если для операции растяжения выбрать функцию, обратную к стандартному нормальному распределению, тогда в случае, если эмпирическое распределение соответствует нормальному распределению, график эмпирического распределения будет иметь прямолинейный вид.

Таблица 7

Результаты расчетов по использованию распределения Парето с учетом погрешности определения вероятности точки усечения

$n_{\text{ус}}$	$D_{\text{тах расчет. верхнее}}$	$D_{\text{тах расчет. табл. 6}}$	ΔD	$D_{\text{прогноз.}}$	$D_{\text{прогноз. табл. 6}}$	$\Delta D_{\text{прогноз.}}$
20	879	867,96	11,04	906	896,9	9,1
141	893	890	3	938	932	6

Рассмотренные ниже подходы в отличие от распределения Парето позволяет аппроксимировать всю функцию распределения, что повышает степень доверия к получаемым результатам.

Использование смеси распределений

Одним из возможных подходов является использование так называемых смесей распределений. Модель смеси распределений описывается формулой

$$f(x) = \sum_{i=1}^k q_i f_i(x, \theta_i); \quad \sum_{i=1}^k q_i = 1,$$

в которой $f_i(x, \theta_i)$, $f(x)$ — плотности соответственно i -й компоненты смеси и результирующего распределения; q_i — вероятность появления в случайной выборке наблюдения с законом f_i ; θ_i — параметры плотности i -й компоненты смеси; k — число компонент смеси.

Начальные моменты смеси распределений определяются по формуле

$$\alpha_r(x) = \sum_{i=1}^k q_i \alpha_{ri},$$

где α_r — начальные моменты результирующего распределения; α_{ri} — i -я компонента смеси распределений.

В том случае, когда компоненты смеси имеют общее математическое ожидание, приведенная формула справедлива и для центральных моментов.

Нетрудно показать, что соответствующим подбором как параметров смеси θ_i , так и весовых коэффициентов q_i можно сформировать распределение с любыми показателями асимметрии и эксцесса [3].

Смеси распределений использовались в Японии, Западной Европе и США в задачах подтверждения требований к безопасности вертикального эшелонирования самолетов [10, 11]. В работе [4] приведены результаты подбора параметров смеси двух нормальных распределений в задаче подтверждения требований к дальности посадки самолета ИЛ-96 по III категории. При этом параметры смеси подбирали комбинаторным методом из условия равенства эмпирических и теоретических моментов.

В данной статье приведен более общий метод подбора параметров смеси из условия максимального совпадения эмпирического и теоретического законов распределения вероятностей.

В качестве параметрической аппроксимации используется смесь нормальных законов распреде-

ления $F^a(x) = \sum_{k=1}^K q_k N((x - m_k)/\sigma_k)$ с параметрами

нормальных законов $\{m_k, \sigma_k, q_k\}$ — математическими ожиданиями, среднеквадратичными отклонениями и весовыми множителями (априорными вероятностями) при $\sum_{k=1}^K q_k = 1$, где k — число составляющих смеси, подбираемых экспериментально.

Параметрическая аппроксимация смесями распределений подбирается путем минимизации функционала по методу наименьших квадратов разностей эмпирической функции распределения и параметрической аппроксимации функции распределения

$$\begin{aligned} \Phi_{\Sigma}(\{m_k, \sigma_k, q_k\}) &= \sum_{i=1}^n \{F^{\text{э}}(x_i) - F^a(x_i)\}^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n \{F^{\text{э}}(x_i) - \sum_{k=1}^K q_k N((x_i - m_k)/\sigma_k)\}^2 \end{aligned}$$

при условии $\sum_{k=1}^K q_k = 1$.

Наибольший интерес представляет поведение функции распределения на одном "хвосте" и, в частности, на правом. Поэтому можно упростить задачу исследования поведения функции распределения на правом "хвосте". Путем проведения эксперимента для аппроксимации правого "хвоста" оказалось достаточным использовать смесь двух нормальных распределений

$$\begin{aligned} F^{\text{э}}(x) &= q_1 N((x - m_1)/s_1) + q_2 N((x - m_2)/s_2), \\ 0 \leq q_1 \leq 1, \quad 0 \leq q_2 \leq 1, \quad q_1 + q_2 &= 1. \end{aligned}$$

Таким образом, необходимо провести поиск минимума по пяти параметрам $m_1, \sigma_1, q_1, m_2, \sigma_2, q_2 = 1 - q_1$.

При построении графика строится не сама функция эмпирического распределения, а ее преобразование с помощью обратной функции нормального распределения.

В связи с этим предлагается изменить функционал, добавив преобразование с помощью обратной функции нормального распределения $N^{(-1)}(F^a(x))$. Добавленное преобразование в функционале увеличивает влияние слагаемых на "хвостах" из-за растяжения "хвостов", т. е. функция приобретает вид

$$\begin{aligned} \Phi_{\Sigma}(\{m_k, \sigma_k, q_k\}) &= \\ &= \sum_{i=1}^n \{N^{(-1)}(F^{\text{э}}(x_i)) - N^{(-1)}(F^a(x_i))\}^2. \quad (2) \end{aligned}$$

Так как точки $\{x_i, i = 1, \dots, n\}$ лежат более плотно в центральном диапазоне, то тем самым аппроксимирующая кривая будет более точной в центральном диапазоне, а на "хвостах" менее точной. Таким образом, этот функционал неявно учитывает эмпирическую плотность вероятности, т. е. аппроксимация проводится в "статистическом" смысле. Эк-

Статистические характеристики теоретической и экспериментальной функции распределения

Число испытанных	Распределение	Моменты			
		Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Показатель асимметрии	Показатель эксцесса
300 000	Экспериментальное	400,713	40,374	≈ 0	4,711
	Смесь	400,423	40,383	≈ 0	4,729
600 000	Экспериментальное	400,720	40,317	≈ 0	4,686
	Смесь	400,509	40,263	≈ 0	4,775
1 000 000	Экспериментальное	400,689	40,339	≈ 0	4,654
	Смесь	400,427	40,302	≈ 0	4,703

вивалентный вид функционала Φ_Σ в интегральной форме — интеграл Стильтьеса

$$\Phi_\Sigma(m_1, \sigma_1, q_1, m_2, \sigma_2, q_2) = \int \{N^{(-1)}(F^\exists(x)) - N^{(-1)}(F^a)\}^2 dF^\exists. \quad (3)$$

Кроме этого, функционал в интегральной форме можно записать в обычном "функциональном" смысле

$$\Phi_j(m_1, \sigma_1, q_1, m_2, \sigma_2, q_2) = \int_{x_1}^{x_n} \{N^{(-1)}(F^\exists(x)) - N^{(-1)}(F^a(x))\}^2 dx. \quad (4)$$

Это приведет к тому, что уменьшится влияние членов там, где имеется большая плотность точек. При интегрировании, например, методом трапеций там, где точки $\{x_i, i = 1, \dots, n\}$ лежат более плотно, Δx_i будет мало и, тем самым, степень влияния подынтегрального выражения в этом диапазоне уменьшается.

На рис. 5 представлены графики правого "хвоста" эмпирического распределения и аппроксимации функции распределения, полученной путем

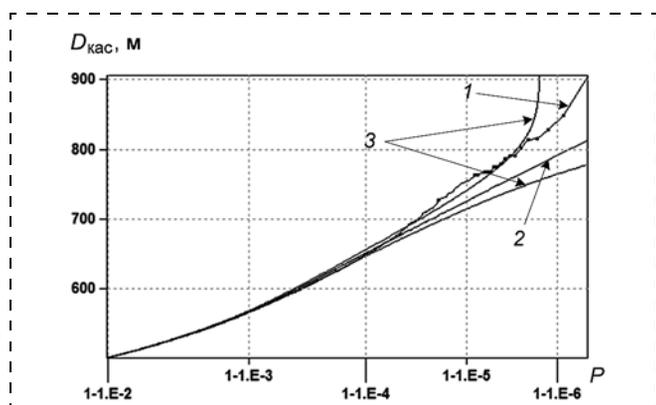


Рис. 5. Правый "хвост" эмпирического распределения и его Σ -аппроксимация: 1 — экспериментальное распределение; 2 — аппроксимация; 3 — доверительные границы

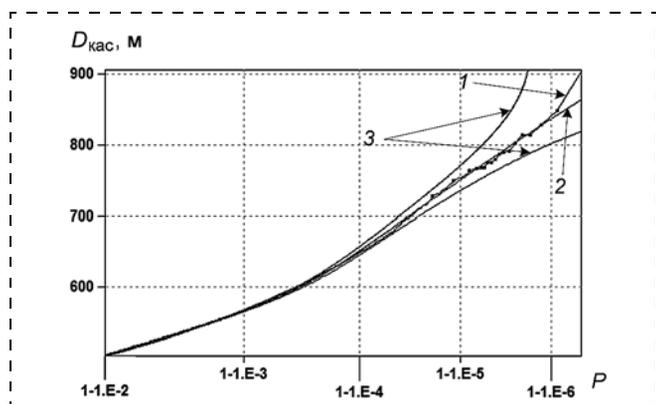


Рис. 6. Правый "хвост" эмпирического распределения и его J -аппроксимация: 1 — экспериментальное распределение; 2 — аппроксимация; 3 — доверительные границы

минимизации Φ_Σ (Σ -аппроксимации). Также на рис. 5 показаны доверительные границы при доверительной вероятности 0,95, вычисленные по методике, приведенной в работе [12].

Далее представим результат минимизации функционала $\Phi_j(m_1, \sigma_1, q_1, m_2, \sigma_2, q_2)$ в интегральной форме (J -аппроксимации). На правом "хвосте" с диапазоном по вероятности от 0,96 до 0,99999 найдены параметры: $m_1 = 258,186, \sigma_1 = 146,107, q_1 = 0,027, m_2 = 335,959, \sigma_2 = 70,394, q_2 = 0,973$. С использованием J -аппроксимации правого диапазона эмпирического распределения вычисляется квантиль дальности при вероятности 0,999999 $X \approx 837,2$ м. На рис. 6 представлены графики эмпирического распределения и J -аппроксимации функции распределения, полученной путем минимизации Φ_j . На рис. 6 также показаны доверительные границы при доверительной вероятности 0,95.

Из сравнения графиков аппроксимаций на рис. 5 и 6 видно, что J -аппроксимация функции распределения (полученная из $\min \Phi_j$) дает большую точность на "хвостах", чем Σ -аппроксимация функции распределения (полученная из $\min \Phi_\Sigma$).

В табл. 8 представлено совпадение основных статистических характеристик теоретической и экспериментальной функции распределения. Совпадение моментов служит подтверждением достоверности предложенного метода.

Метод использования сплайн-аппроксимации

Сплайн-аппроксимацию будем применять к функции $S_n^\exists(x) = N^{(-1)}(F_n^\exists(x))$.

Будем предполагать, что значения экспериментальной функции $S_n^\exists(x_i)$ определены с погрешностью в виде случайной величины с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $D_i^S = D(S_n^\exists(x_i))$ [13]. Тогда оценку отклонения аппроксимирующей функ-

ции $S_n^a(x_i)$ от экспериментальной функции $S_n^э(x_i)$ можно представить в виде

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^S} (S_n^э(x_i) - S_n^a(x_i))^2 = cn, \quad (5)$$

где константа c подбирается экспериментально. Этому условию может удовлетворять множество аппроксимирующих функций. Из этого множества функций по теории сплайн-функции следует выбрать функцию, обладающую свойством гладкости. В теории сплайн-функции функционал гладкости функции $S(x)$ задается интегралом от квадрата $S''(x)$:

$$I_2(S) = \int_{x=x_1}^{x_n} (S''(x))^2 dx. \quad (6)$$

Таким образом, аппроксимирующая функция $S_n^a(x_i)$ должна минимизировать функционал (6) при условии (5). Вводя множитель Лагранжа λ , сведем задачу условной минимизации к безусловной задаче минимизации по двум переменным S_n^a и λ следующего функционала:

$$I_2(S_n^a) + \lambda \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^S} (S_n^э(x_i) - S_n^a(x_i))^2 - cn \right]. \quad (7)$$

Поиск экстремума функционала (7) предполагается проводить следующим образом. При каждом фиксированном λ проводится минимизация выражения (7) по S_n^a и определяется \bar{S}_n^a . Условие (5) является необходимым условием экстремума по переменной λ . Используя одномерный поиск по переменной λ с определением \bar{S}_n^a , можно подобрать такое λ , при котором будет выполнено условие (5).

Для значений экспериментальной функции $S_n^э(x_i)$ можно приблизительно указать дисперсии D_i^S .

Известно, что распределение разбросов экспериментальной функции распределения подчиняется биномиальному закону $F_n^э(x)$ с дисперсией $D_i^F = F_n^э(x_i)(1 - F_n^э(x_i))/n$.

При определении дисперсии D_i^S функции $S_n^э(x_i)$ необходимо учесть обратное преобразование $S_n^э(x) = N^{(-1)}(F_n^э(x))$.

Рассмотрим линейное приближение преобразования

$$\begin{aligned} S_n^э(x_i) &= N^{(-1)}(F_n^э(x_i)) = N^{(-1)}(F^n(x_i) + \sigma_i^P) = \\ &= N^{(-1)}(F^n(x_i)) + \frac{\sigma_i^P}{dN/dt} + 0(\sigma_i^P), \end{aligned}$$

где производная нормального распределения берется в точке $t = N^{(-1)}(F^n(x_i))$, а F^n — истинная функция распределения.

Отсюда приблизительно $D_i^S = \frac{D_i^P}{(dN/dt)^2}$, где

$$dN/dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2}.$$

Полное выражение дисперсии случайной величины $S_n^э(x_i)$ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} D_i^S &= \frac{F^n(x_i)(1 - F^n(x_i))}{n \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \right)^2} = \\ &= 2\pi e^{t^2} F^n(x_i)(1 - F^n(x_i))/n, \end{aligned} \quad (8)$$

где $t = N^{(-1)}(F_n^э(x_i))$.

Так как значение истинной функции распределения $F^n(x_i)$ не известно, в первом приближении вместо этого берем значение экспериментальной функции распределения $F_n^э(x_i)$:

$$D_i^S = 2\pi e^{t^2} F_n^э(x_i)(1 - F_n^э(x_i))/n, \quad (9)$$

где $t = N^{(-1)}(F_n^э(x_i))$.

Задача определения сплайн-функции путем минимизации выражения (7) при фиксированном параметре λ может быть решена по методике, описанной в работе [12]. Минимизируемый функционал в работе [12] имеет несколько отличный вид:

$$I_2(S_n^a) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_i} (S_n^э(x_i) - S_n^a(x_i))^2. \quad (10)$$

Сведем вид функционала (7) при фиксированном параметре λ к виду (10):

$$\begin{aligned} I_2(S_n^a) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^S/\lambda} (S_n^э(x_i) - S_n^a(x_i))^2, \\ \text{т. е. } \rho_i = D_i^S/\lambda. \end{aligned} \quad (11)$$

При фиксированном параметре λ слагаемое λcn также фиксировано, поэтому его можно не учитывать при минимизации.

В данной работе используется представление аппроксимирующей функции через параметры вида $M_i = d^2 S_n^a(x_i)/(dx)^2$. На каждом отрезке $[x_i, x_{i+1}]$ аппроксимирующая функция задается полиномом 3-й степени вида

$$\begin{aligned} S_n^a(x) &= S_n^a(x_i)(1 - t) + S_n^a(x_{i+1})t - \frac{h_i^2}{6} t(1 - t) \times \\ &\times [(2 - t)M_i + (1 + t)M_{i+1}], \end{aligned} \quad (12)$$

$$x \in [x_i, x_{i+1}], i = 0, 1, \dots, n - 1, h_i = x_{i+1} - x_i,$$

$$M_i = (S_n^a)''(x_i), t = \frac{x - x_i}{h_i}, 0 \leq t \leq 1.$$

Параметры $S_n^a(x_i)$ и M_i являются искомыми. Параметры ищутся из условия минимизации функционала (10), требования непрерывности первой производной сплайн-функции $(S_n^a)'(x_i - 0) = (S_n^a)'(x_i + 0)$ и краевых условий $(S_n^a)''(x_0) = (S_n^a)''(x_n) = 0$.

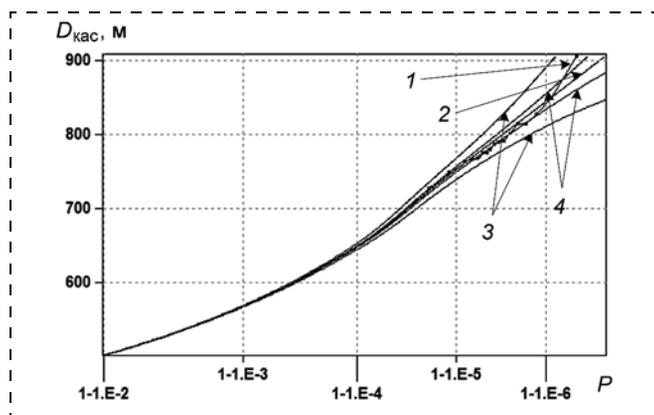


Рис. 7. Сплайн-аппроксимация функции распределения с границами $3\sqrt{cD_i^S}$ и $3\sqrt{D_i^S}$:
1 — экспериментальное распределение; 2 — аппроксимация; 3 — доверительные границы с учетом c ; 4 — доверительные границы без учета c

Таблица 9
Статистические характеристики теоретической и экспериментальной функции распределения

Число испытаний	Распределение	Моменты			
		Математическое ожидание	Средне-квадратическое отклонение	Показатель асимметрии	Показатель эксцесса
300 000	Экспериментальное	400,713	40,374	≈ 0	4,711
	Сплайны	400,705	40,368	≈ 0	4,686
600 000	Экспериментальное	400,720	40,317	≈ 0	4,686
	Сплайны	400,711	40,312	≈ 0	4,669
1 000 000	Экспериментальное	400,689	40,339	≈ 0	4,654
	Сплайны	400,605	40,376	≈ 0	4,631

Таблица 10

Результаты прогнозирования дальности касания

Число реализаций	Метод аппроксимации	Результат прогнозирования, м	Экспериментальное значение на 1 млн реализаций — 814,9 м
300 000	Парето	839,673	
	Смеси	857,746	
	Сплайны	826,03	
600 000	Парето	830,435	
	Смеси	848,35	
	Сплайны	825,08	
1 000 000	Парето	815,865	
	Смеси	829,842	
	Сплайны	818,67	

На рис. 7 представлен график сплайн-аппроксимации функции распределения вероятности, полученный из решения задачи (5) и (6) при параметре $c = 0,1$. Аппроксимация проводилась для правого "хвоста" эмпирической функции распределения, начиная с точки, где сама экспериментальная вероятность имеет достаточно хорошую точность $F_n^3(x) \geq 0,999$.

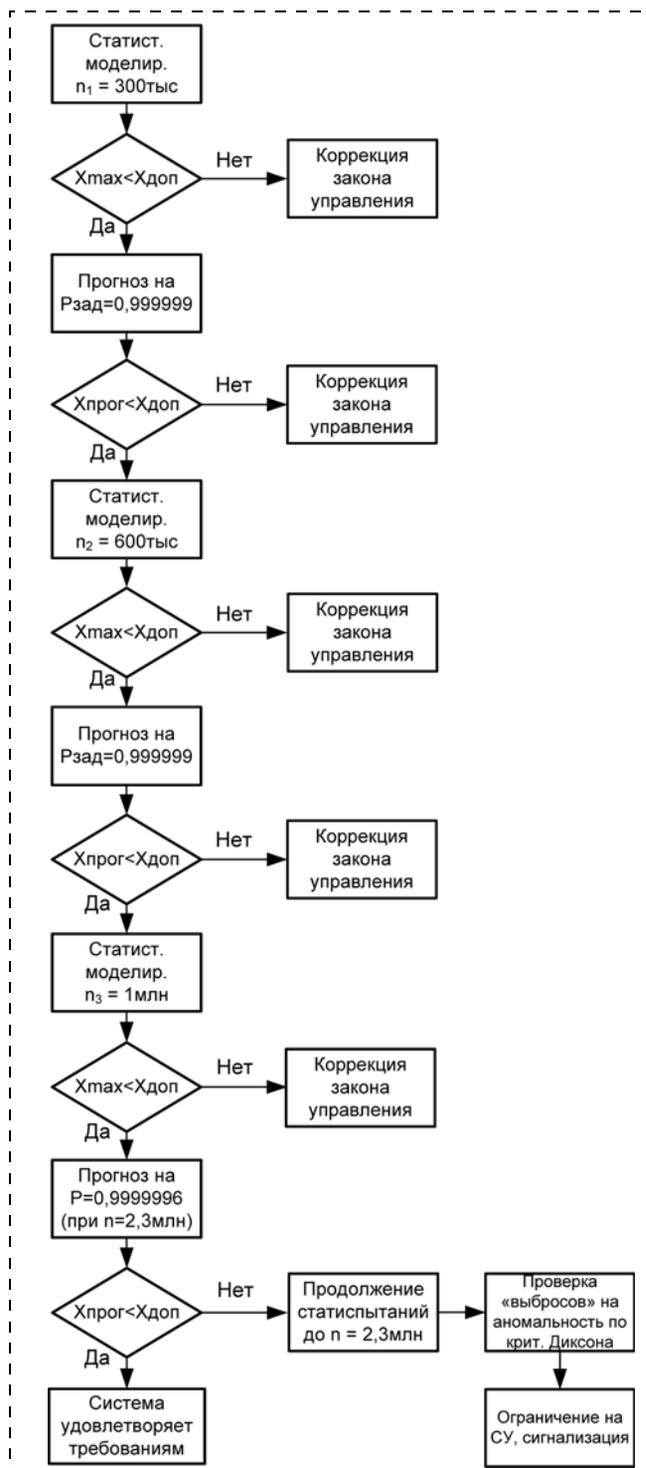


Рис. 8. Блок-схема экспресс-анализа в процессе отработки закона управления автоматической посадки самолета

Графики верхней и нижней границ разбросов эмпирических вероятностей получены по правилу 3σ , отложенных от сплайн-аппроксимации функции, где в качестве σ принята действительная σ (с учетом константы c), использованная при поиске сплайн-аппроксимации $3\sqrt{cD_i^S}$ распределения и σ (без учета константы c), использованная при поиске сплайн-аппроксимации $3\sqrt{D_i^S}$.

В табл. 9 представлено совпадение основных статистических характеристик теоретической и экспериментальной функции распределения. Совпадение моментов служит подтверждением достоверности предложенного метода.

В табл. 10 приведены результаты прогнозирования дальности касания, осуществляемого всеми тремя методами на 1 млн реализаций.

Таким образом, наилучшую точность аппроксимации обеспечивают распределение Парето и сплайны, при этом расхождение между результатами для этих двух методов незначительно (max 13 м) и уменьшается с ростом объема реализаций. Заметим также, что все рассмотренные методы дают некоторую "переоценку" экспериментального значения, что обеспечивает гарантию полученных результатов.

Так как статистическое моделирование автоматической посадки самолета осуществляется "порциями", в заключение приведена логическая схема принятия решений в процессе моделирования (рис. 8), позволяющая в случае необходимости вовремя прервать процесс моделирования и сократить тем самым время и затраты на него. Предлагаемый метод может быть с успехом использован для экспресс-анализа при отработке систем автоматической посадки самолетов по III категории.

1. Александровская Л. Н., Борисов В. Г., Мазур В. Н., Хлгтян С. В., Ардалионова А. Е. Непараметрические методы оценки соответствия требований к безопасности автоматической посадки самолетов нормам летной годности // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3.
2. Кузнецов А. Г., Александровская Л. Н., Мазур В. Н., Хлгтян С. В. Методы подтверждения соответствия точностных характеристик систем управления самолетов нормам летной годности // Авиакосмическое приборостроение. 2000. № 1.
3. Александровская Л. Н., Борисов В. Г., Мазур В. Н., Хлгтян С. В., Ардалионова А. Е. Метод моментов в задаче оценки соответствия требованиям к безопасности самолетов при автоматической посадке // Труды МИЭА. 2013. Вып. 6.
4. Крюков С. П., Бодрунов С. Д., Александровская Л. Н., Аронов И. З., Захаревич А. П., Кузнецов А. Г., Кушельман В. Я. Методы анализа и оценивания рисков в задачах менеджмента безопасности сложных технических систем. СПб.: Корпорация "Аэрокосмическое оборудование", 2007.
5. Кендалл М., Стьюарт А. Теория распределений. М.: Наука, 1966.
6. Хан Г., Шапиро С. Статистические методы в инженерных задачах. М.: Мир, 1969.
7. Больше Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983.
8. Александровская Л. Н., Борисов В. Г., Мазур В. Н., Хлгтян С. В., Ардалионова А. Е. Новые методы измерения малых рисков в задачах оценки соответствия требованиям к безопасности автоматической посадки самолетов // Труды МИЭА. 2013. Вып. 6.
9. Shakarian A. Application of Monte-Carlo techniques to the 757/767 autol and dispersion analysis by Simulation // AIAA Guidance and Control Conference. New York, USA, 1983.
10. Vertical Separation at High Altitudes RGCSF-WG/WHL/8 — WP/7, 8.
11. Review of the General Concept of Separation Panel Sixth Meeting.
12. Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Введение в математическую статистику. М.: Изд-во ЛКИ, 2010.
13. Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л. Методы сплайн-функций. М.: Наука, ФИЗМАТЛИТ, 1980.

Уважаемые авторы!

Сообщаем Вам, что в связи с подготовкой журнала "Мехатроника, автоматизация, управление" к включению в международные наукометрические базы данных редакция скорректировала требования к статьям и к сопровождающим их материалам, направляемым в адрес редакции. Просьба детально ознакомиться с новыми правилами и строго руководствоваться ими.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Материалы статьи должны соответствовать тематике журнала и содержать новые результаты исследований, не опубликованные ранее и не предназначенные к публикации в других печатных или электронных изданиях. Для опубликования статьи в редакцию журнала направляются следующие материалы:

- рукопись статьи в doc- и pdf-форматах;
- таблицы, иллюстрации и перечень подрисуночных подписей;
- сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученые степень и звание, должность, место работы, служебный и домашний адреса, телефоны и E-mail;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати;
- англоязычная информация, содержащая данные статьи, необходимые для индексирования журнала в международных наукометрических базах данных.

Если статья высылается почтовой бандеролью, то в нее необходимо вложить диск с электронной версией перечисленных материалов.

Все статьи проходят обязательное рецензирование. Просьба редакции о доработке рукописи не означает, что статья принята к печати, так как она вновь будет рассматриваться рецензентами, а затем редакцией. Редакция оставляет за собой право не возвращать автору отклоненную статью и не вести дискуссию по мотивам отклонения. Редакция оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отправлять авторам на доработку.

ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ СТАТЬИ

Статья должна быть структурирована, т. е. должна включать *разделы* с названиями, кратко и точно отражающими их содержание, в том числе:

- введение, содержащее обоснование актуальности и краткий обзор проблематики;
- четкую постановку задачи исследования;
- описание метода решения задачи исследования;
- прикладную интерпретацию и иллюстрацию полученных результатов исследования;
- заключение, включающее обобщение и указание области применения полученных результатов, не повторяющее аннотацию и не ограничивающееся простым перечислением того, что сделано в работе.

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ СТАТЬИ

Объем рукописи статьи, предлагаемой к публикации, должен быть не менее 10 и не более 20 страниц машинописного текста, напечатанного на одной стороне белого листа бумаги формата А4 с полями со всех сторон не менее 2 см, с абзацным отступом 1 см, с полуторным межстрочным интервалом, с использованием текстового редактора Microsoft Word (любая версия) с шрифтом Times New Roman размером 14 pt.

В указанный объем статьи входят: текст, приложения, иллюстрации, таблицы, список литературы. В отдельных случаях по решению редколлегии объем статьи может быть увеличен. Страницы рукописи должны быть пронумерованы, начиная с первой.

Материал статьи должен быть изложен в следующей последовательности:

- *шифр УДК* в левом верхнем углу;
- *инициалы и фамилия автора* (полужирным шрифтом по центру), ученое звание, должность, e-mail;
- *название организации* (без сокращений), город (если организаций больше, чем одна, то указываются все организации со сносками после фамилий соответствующих авторов; в случае совпадения места работы авторов нужно указывать его один раз для всей группы авторов);
- *название статьи* (полужирным шрифтом по центру) не более 12 слов;
- *аннотация* (объемом 5—7 строчек), в предельно сжатой форме излагающая суть работы и полученные результаты;
- *ключевые слова* (8—10 слов), несущие в тексте основную смысловую нагрузку;
- *текст статьи* с учетом указанных далее требований к его оформлению;
- *список литературы*, оформленный по ГОСТ Р 7.0.5—2008;
- *англоязычная информация по статье*.

В тексте статьи следует придерживаться общепринятой терминологии, а все используемые специальные термины, обозначения и аббревиатуры должны быть раскрыты и разъяснены.

Формулы должны быть набраны четко с соблюдением различий в написании прописных и строчных букв, а также букв, сходных по начертанию. Индексы и показатели степени следует писать строго ниже или выше строки. В формулах русские и греческие буквы следует набирать прямо, а латинские буквы, обозначающие скалярные переменные, — курсивом. Величины, обозначающие векторы и матрицы, должны быть выделены полужирным шрифтом и набраны прямо (допускается также набор всех величин, обозна-

ченных латинскими буквами, в том числе матриц и векторов, светлым курсивом); знак транспонирования — буквой "t" строчной прямой; экспонента — буквой "e" полужирной прямой. Стандартные математические обозначения (например, max, log, sin и т. д.) должны быть набраны прямо. Номера формул пишутся справа в круглых скобках. Нумерация формул сквозная и дается в порядке их появления, причем нумеруются только формулы, на которые имеются ссылки в тексте.

Список литературы имеет сквозную нумерацию в порядке упоминания в тексте и содержит следующие данные: фамилия и инициалы автора, название работы, название журнала, сборника (если это не монография), город и полное название издательства (для монографии), год издания, том, номер журнала и страницы. Ссылки на литературные источники даются в квадратных скобках. Допускаются ссылки на электронные носители.

Рисунки и таблицы должны быть выполнены качественно (графическая обработка рисунков в редакции не предполагается). В журнале все рисунки воспроизводятся в черно-белом варианте, за исключением цветных рисунков, размещаемых по усмотрению редакции на обложке журнала.

При подготовке рисунков в электронном виде просим соблюдать следующие требования к растровым изображениям:

TIFF (PhotoShop): — полутоновые цветные — 300 dpi, CMYK;
— полутоновые черно-белые — 300 dpi;
— штриховые иллюстрации — 600 dpi.

Толщина линий должна быть не менее 0,15 мм.

Масштаб надписей должен быть соразмерным с самим рисунком.

Рисунки и таблицы дублируются на отдельных листах, подрисовочные подписи даются отдельным списком. Обозначения на рисунках должны строго соответствовать обозначениям, принятым в тексте, и иметь идентичное написание. Надписка на рисунках должна быть достаточно крупной, чтобы сохранять четкость при уменьшении масштаба рисунка. Не допускаются особо мелкие надписки на рисунках, включая обозначения и оцифровку осей на графиках. Цифровые выноски на рисунках должны быть выполнены курсивом; единицы измерения на осях графиков пишутся через запятую и на русском языке.

Англоязычная информация должна включать (согласно требованиям зарубежных аналитических баз данных) следующие данные:

- инициалы и фамилии каждого автора, занимаемая должность, e-mail, место работы (при совпадении места работы авторов нужно указывать его один раз для всей группы авторов);
- название статьи; аннотация статьи объемом не менее 130 слов, написанная качественным английским языком, отражающая основное содержание статьи с указанием цели, задачи, результатов исследования и кратких выводов;
- ключевые слова, объемом 10-12 слов;
- список литературы в романском алфавите (латинице) т. е. необходимо транслитерировать на латинский шрифт (рекомендуем <http://translit.ru/>) инициалы авторов, название источника публикации и место издания, а технические сокращения (номер, том, страница и т. п.) должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — N., том — V., страницы — P. и т. п.).

Редакция не предоставляет авторских экземпляров журнала и может выслать авторам электронный вариант статьи в pdf-формате. Если авторы хотят гарантированно получить журнал со своей статьей, то им необходимо оформить подписку на этот номер.

Публикация в журнале бесплатная.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова*.

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Т. В. Пчелкина*.

Сдано в набор 08.04.2014. Подписано в печать 15.05.2014. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН614. 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.