

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Том 18
2017
№ 1

Рисунки к статье С. Л. Зенкевича, Хуа Чжу
«УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ РОБОТОВ В СТРОЮ ТИПА “КОНВОЙ”»



Рис. 1. Группа мобильных роботов в строю типа “конвой”

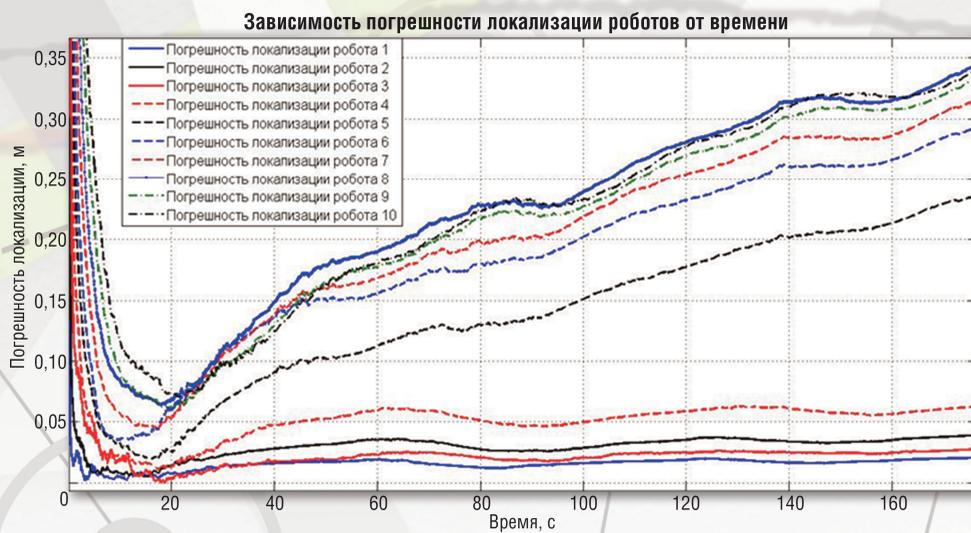


Рис. 6. Погрешности локализации ведомых роботов

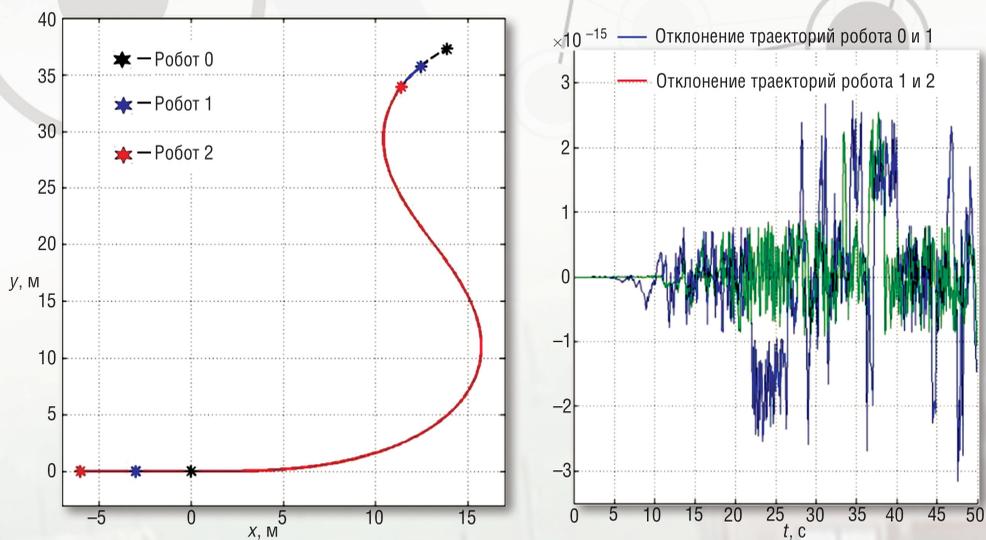


Рис. 6. Погрешности локализации ведомых роботов

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

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

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

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

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Воротников В. И., Вохмянина А. В. К задаче линеаризации нелинейных управляемых систем посредством обратной связи 3

Сизых В. В., Шахтарин Б. И., Шевцев В. А. Механизм срыва слежения в стохастических аналоговых системах фазовой автоподстройки первого и второго порядков 7

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Шляхов Н. Е., Ватаманюк И. В., Ронжин А. Л. Обзор методов и алгоритмов агрегации роя роботов 22

Зенкевич С. Л., Хуа Чжу. Управление движением группы роботов в строю типа "конвой" 30

Аль Аккад М. А., Абрамов И. В., Хворенков В. В. Обратная кинематическая задача для управления амбидекстральными конечностями человекоподобного робота 34

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Кобзев А. А., Лекарева А. В. Преодоление избыточности при решении задачи кинематики для руки оператора транспортного средства 41

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Брякин И. В. Магнитометр с тестовым алгоритмом функционирования 49

Герман-Галкин С. Г., Гаврилов Р. С., Мустафаев Ю. Н. Структурные и имитационные модели в модельно-ориентированном проектировании вентильного электропривода для опорно-поворотного устройства 56

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

Романов М. П., Романов А. М., Каширская Е. Н., Холопов В. А., Харченко А. И. Новая архитектура систем управления исполнительного уровня для дискретного машиностроительного производства 64

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

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

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia, Moscow

Deputy Editor-in-Chief:

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

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu., Russia, Moscow

Editorial Board:

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

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V., Russia, Moscow

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

CONTENTS

METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

- Vorotnikov V. I., Vokhmyanina A. V.** Concerning the Problem of the Exact Feedback Linearization of the Nonlinear Control Systems. 3
Sizykh V. V., Shakhtarin B. I., Shevtsev V. A. Mechanism of the Cycle Slips in the Stochastic Analog Phase-Locked Loops of the First and Second Orders. 7

ROBOTIC SYSTEMS

- Shlyakhov N. E., Vatamaniuk I. V., Ronzhin A. L.** Review of the Methods and Algorithms of a Robot Swarm Aggregation. 22
Zenkevich S. L., Zhu Hua. Control of a Group of Mobile Robots Moving in the Convoy Type Formation. 30
Al Akkad M. A., Abramov I. V., Khvorenkov V. V. Inverse Kinematic Analysis for Control of Human-Like Ambidextrous Robotic Hands. 34

ERGATIC CONTROL SYSTEM

- Kobzev A. A., Lekareva A. V.** Overcoming Redundancy in Solution of the Inverse Kinematics Problem for a Vehicle Operator's Hand. 41

MEASURING AND ACTUATORS OF MECHATRONIC SYSTEMS

- Bryakin I. V.** Magnetometer with a Test Algorithm of Functioning. 49
German-Galkin S. G., Gavrillov R. S., Mustafayev Yu. N. Structural and Simulation Models in the Model-oriented Designing of the Electric Valve Actuator for a Rotary Support Device. 56

AUTOMATION SYSTEM OF PRODUCTION

- Romanov M. P., Romanov A. M., Kashirskaya E. N., Kholopov V. A., Kharchenko A. I.** A Novel Architecture for the Executive-Level Control Systems for a Discrete Machinery Production. 64

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

В. И. Воротников, д-р физ.-мат. наук, проф., vorot@ntiustu.ru, **А. В. Вохмянина**, аспирант, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

К задаче линеаризации нелинейных управляемых систем посредством обратной связи

Показано, что выбор обратной связи в задаче точной линеаризации нелинейных управляемых систем может зависеть не только от вида исходной управляемой системы и рассматриваемой области фазового пространства, но также и от начальных условий в решаемой задаче управления. В качестве примера рассмотрена задача трехосной переориентации асимметричного твердого тела посредством трех двигателей-маховиков.

Ключевые слова: особенность построения линеаризующей обратной связи, переориентация гиростата

Введение

Одним из эффективных методов решения нелинейных задач управления является метод построения нелинейной обратной связи, которая позволяет провести линеаризацию исходной нелинейной управляемой системы по части или по всем ее фазовым переменным. Данный метод часто называют методом точной линеаризации (exact feedback linearization).

Возможность успешного выбора линеаризующей обратной связи зависит как от вида исходной управляемой системы, так и от рассматриваемой области фазового пространства. Систематические исследования (как теоретические, так и прикладные) на эту тему, опирающиеся на аппарат алгебр Ли, начались в 80-е годы прошлого столетия (см., например, монографии [1–5]). К данному направлению примыкают также проводившиеся в это же время исследования по частичной устойчивости (стабилизации) и управляемости динамических систем [6, 7]. Наиболее успешные случаи применения метода точной линеаризации, по-видимому, относятся к задачам механики, таким как управление ориентацией твердых тел (космических аппаратов) и управление движением подвижных экипажей (колесных роботов) (см., например, работы [6–9]).

Линеаризующая обратная связь, как правило, зависит от всех переменных, определяющих состояние системы. Далее в работе показывается, что при наличии у нелинейной управляемой системы первого интеграла в построении линеаризующей обратной связи может возникнуть особенность, если процесс управления стартует из начального состояния, соответствующего нулевому значению первого интеграла. Особенность сводится к тому, что линеаризующая обратная связь в данном случае может оказаться значительно проще и может зависеть от меньшего числа фазовых координат системы.

В качестве примера рассмотрена нелинейная задача трехосной переориентации асимметричного твердого тела посредством трех маховиков (роторов), где указанная особенность в выборе линеаризующей обратной связи возникает в случае нулевых начальных значений угловой скорости тела и маховиков.

1. Особенность построения линеаризующей обратной связи

Пусть нелинейная управляемая система обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\mathbf{x}' = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (1.1)$$

имеет первый интеграл

$$v(\mathbf{x}) = v_1^2(\mathbf{x}) + \dots + v_k^2(\mathbf{x}) = \text{const.} \quad (1.2)$$

Вектор управлений $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*)$ является линеаризующей обратной связью в некоторой области D фазового пространства системы (1.1), (1.2), если из системы (1.1), (1.2) в области D можно выделить линейную систему дифференциальных уравнений

$$\mathbf{w}' = A\mathbf{w} + B\mathbf{u}^*, \quad (1.3)$$

фазовый вектор \mathbf{w} которой состоит из части компонент вектора \mathbf{x} .

Допустим, что $\mathbf{x} = (\mathbf{y}^T, \mathbf{z}^T)^T$ (для определенности считаем, что размерность вектора \mathbf{y} больше размерности вектора \mathbf{w}), и линеаризующая обратная связь для системы (1.1), (1.2) имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}_1(\mathbf{y}) + \mathbf{u}_2(\mathbf{x}, v_1(\mathbf{x}), \dots, v_k(\mathbf{x})); \\ \mathbf{u}_2(\mathbf{x}, 0, \dots, 0) &\equiv \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

В этом случае нетрудно показать, что при старте системы (1.1), (1.2) с множества $M = \{\mathbf{x}_0: v(\mathbf{x}_0) = 0\}$ линеаризующая обратная связь (1.4) упрощается и определяется следующим образом:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1(\mathbf{y}). \quad (1.5)$$

Таким образом, при наличии у нелинейной управляемой системы первого интеграла в построении линеаризующей обратной связи может возникнуть особенность. Эта особенность возникает, если управляемый процесс стартует из начального состояния, соответствующему нулевому значению первого интеграла. Особенность сводится к тому, что линеаризующая обратная связь в данном случае может оказаться значительно проще и может зависеть от меньшего числа фазовых координат системы.

2. Задача переориентации асимметричного твердого тела

Покажем, что указанная выше особенность в выборе линеаризующей обратной связи имеет место при решении задачи переориентации асимметричного твердого тела посредством трех маховиков (роторов) в случае нулевых начальных значений угловой скорости тела и маховиков.

2.1. Постановка задачи. Пусть имеем асимметричное твердое тело, вдоль главных центральных осей инерции которого закреплены оси вращения однородных симметричных маховиков. Вращательное движение этой системы (гиростата) вокруг центра масс описывается дифференциальными уравнениями [10]

$$\begin{aligned} (A_1 - J_1)x_1' &= (A_2 - A_3)x_2x_3 + J_2x_3\varphi_2' - J_3x_2\varphi_3' - u_1; \\ (A_2 - J_2)x_2' &= (A_3 - A_1)x_1x_3 + J_3x_1\varphi_3' - J_1x_3\varphi_1' - u_2; \\ (A_3 - J_3)x_3' &= (A_1 - A_2)x_1x_2 + J_1x_2\varphi_1' - J_2x_1\varphi_2' - u_3; \\ J_i(\varphi_i'' + x_i') &= u_i, \end{aligned} \quad (2.1)$$

в которых A_i — главные центральные моменты инерции гиростата; x_i — проекции вектора угловой скорости основного тела на главные центральные оси \mathbf{k}_i эллипсоида инерции гиростата; J_i, φ_i — осевые моменты инерции и углы поворота маховиков (роторов), оси вращения которых неподвижно закреплены вдоль осей \mathbf{k}_i . Управляющие моменты u_i (моменты внутренних сил) приложены к маховикам и создаются специальными двигателями. Обозначим $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\varphi}'$ — векторы, состоящие соответственно из x_i, u_i, φ_i' . Здесь и далее i меняется от 1 до 3.

Наряду с уравнениями (2.1) рассмотрим определяющие ориентацию твердого тела кинематические уравнения в переменных Родрига—Гамильтона [11]:

$$\begin{aligned} 2\eta_1' &= \eta_4x_1 + \eta_2x_3 - \eta_3x_2; \\ 2\eta_2' &= \eta_4x_2 + \eta_3x_1 - \eta_1x_3; \\ 2\eta_3' &= \eta_4x_3 + \eta_1x_2 - \eta_2x_1; \\ \eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_3^2 + \eta_4^2 &= 1. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Обозначим $\boldsymbol{\eta}$ — вектор, состоящий из η_i и η_4 (в указанном порядке).

Управляющие моменты $u_i = u_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta})$ ищутся по принципу обратной связи в классе K разрывных по

$\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta}$ функций. Реализации $u_i[t]$ являются измеримыми функциями, удовлетворяющими заданным ограничениям

$$|u_i| \leq \alpha_i = \text{const} > 0. \quad (2.3)$$

Решения системы (2.1), (2.2) при $u_i \in K$ понимаются в смысле А. Ф. Филиппова [12].

Задача (трехосной переориентации). Требуется найти приложенные к маховикам управляющие моменты $u_i \in K$, переводящие твердое тело за конечное время из произвольного начального положения $\boldsymbol{\eta}(t_0) = \boldsymbol{\eta}_0$ в заданное $\boldsymbol{\eta}(t_1) = \boldsymbol{\eta}_1$. Оба состояния являются состояниями покоя $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}(t_1) = \mathbf{0}$. Кроме того, $\boldsymbol{\varphi}'(t_0) = \mathbf{0}$. Момент времени $t_1 > t_0$ не фиксируется.

Не нарушая общности, считаем $\boldsymbol{\eta}(t_1) = (0, 0, 0, 1)$. В данном случае в процессе переориентации происходит совмещение связанной с телом и заданной систем координат. Случай произвольного начального и конечного положения тела будет рассмотрен при описании алгоритма решения поставленной задачи управления.

Отметим, что данная задача является задачей управления не по всем фазовым переменным, а по части переменных [6, 7, 13], определяющих состояние системы (1.1), (1.2) — по переменным x_i, η_i , определяющим состояние основного тела рассматриваемой механической системы.

2.2. Линеаризующая обратная связь и ее особенность. Проведем линеаризацию исходной нелинейной системы (2.1), (2.2) по переменным η_i в области $\eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_3^2 \leq 1 - \varepsilon^2$ ($\eta_4^2 \geq \varepsilon^2$). Это можно сделать посредством нелинейных управляющих моментов вида (выписано только выражение для u_1 ; выражения для u_2 и u_3 получаются из u_1 циклической перестановкой индексов $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$)

$$\begin{aligned} u_1 = & -\frac{2(A_1 - J_1)}{\eta_4} [u_1^*(\eta_1^2 + \eta_4^2) + u_2^*(\eta_1\eta_2 + \eta_3\eta_4) + \\ & + u_3^*(\eta_1\eta_3 - \eta_2\eta_4) + 1/4\eta_1(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)] + \\ & + (A_2x_2 + J_2\varphi_2')x_3 - (A_3x_3 + J_3\varphi_3')x_2 \\ & (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3), \end{aligned} \quad (2.4)$$

позволяющих выделить из замкнутой нелинейной системы (1.1), (1.2), (2.4) линейную подсистему дифференциальных уравнений

$$\eta_i'' = u_i^*. \quad (2.5)$$

Отметим, что система дифференциальных уравнений (2.1) имеет первый интеграл вида (1.2), в котором

$$v_i = A_ix_i(t) + J_i\varphi_i'(t)$$

и, следовательно, выбранные управляющие моменты u_i можно представить в виде (1.4).

Поскольку в рассматриваемой задаче переориентации управляемый процесс начинается на мно-

жестве M , где $v_i = 0$, то линеаризующая обратная связь (2.4) упрощается и имеет вид (1.5), т.е.

$$u_1 = -\frac{2(A_1 - J_1)}{\eta_4} [u_1^*(\eta_1^2 + \eta_4^2) + u_2^*(\eta_1\eta_2 + \eta_3\eta_4) + u_3^*(\eta_1\eta_3 - \eta_2\eta_4) + 1/4\eta_1(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)] \quad (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3). \quad (2.6)$$

В отличие от управляющих моментов (2.4), управляющие моменты (2.6) не содержат переменных φ'_i , определяющих текущие угловые скорости маховиков.

2.3. Вспомогательная линейная задача управления.

Для линейной системы (2.5) решим задачу управления о быстрейшем приведении в положение

$$\eta_i = \eta'_i = 0. \quad (2.7)$$

Управление осуществляется посредством u_i^* , которые считаем удовлетворяющими ограничениям

$$|u_i^*| \leq \alpha_i^*. \quad (2.8)$$

Процедура назначения уровней α_i^* рассматривается ниже.

При заданных α_i^* решение (в форме синтеза) указанной вспомогательной задачи управления для системы (2.5) имеет вид [14]

$$u_i^*(\eta_i, \eta'_i) = \begin{cases} \alpha_i^* \operatorname{sgn} \psi_i(\eta_i, \eta'_i), & \psi_i \neq 0; \\ \alpha_i^* \operatorname{sgn} \eta_i = -\alpha_i^* \operatorname{sgn} \eta'_i, & \psi_i = 0, \end{cases} \quad (2.9)$$

где $\psi_i(\eta_i, \eta'_i) = -\eta_i - (2\alpha_i^*)^{-1} \eta'_i |\eta'_i|$ – функции переключений.

Движения системы (2.5), (2.9) на фазовых плоскостях переменных η_i, η'_i будут сначала происходить (до достижения кривых переключений) по дугам парабол, являющихся траекториями систем $\eta_i'' = u_i^*$ при u_i^* вида (2.9). Далее, попав на кривые переключений $\psi_i(\eta_i, \eta'_i) = 0$, движения будут происходить вдоль них в скользящем режиме до достижения требуемых конечных значений $\eta_i = \eta'_i = 0$. На участках решений, соответствующих скользящим режимам, вспомогательные управления u_i^* принимают значения $\pm \alpha_i^*$ с бесконечно частыми сменами знака.

Величина

$$\tau = \max(\tau_i), \quad \tau_i = 2\{|\eta_{i0}|(\alpha_i^*)^{-1}\}^{1/2} \quad (2.10)$$

определяет минимальное время τ достижения положения $\eta_i = \eta'_i = 0$ во вспомогательной задаче управления. Отметим, что те подсистемы системы (2.2), которые придут в требуемое положение раньше, чем последняя из них, будут оставаться в этом положении.

2.4. Алгоритм решения задачи трехосной переориентации. Решая уравнения системы (2.2) как алгебраические относительно x_i , получаем равенства

$$x_1 = \frac{2}{\eta_4} [\eta'_1(\eta_1^2 + \eta_4^2) + \eta'_2(\eta_1\eta_2 + \eta_3\eta_4) + \eta'_3(\eta_1\eta_3 - \eta_2\eta_4)] \quad (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3). \quad (2.11)$$

Поэтому решение рассмотренной линейной задачи о быстрейшем приведении в положение (2.7) означает решение исходной нелинейной задачи переориентации посредством управляющих моментов (2.6). Число τ определяет время переориентации.

Итерационный алгоритм решения поставленной нелинейной задачи переориентации включает следующие этапы.

1. Выбор конструкции (2.6) управляющих моментов u_i с u_i^* вида (2.9). В случае $\eta(t_1) \neq (0, 0, 0, 1)$ достаточно перейти к управляющим моментам, получающимся из (2.6) перестановкой индексов. А именно, наряду с конструкцией (2.6) можно рассматривать конструкции управляющих моментов вида

$$u_i = \eta_s^{-1} f_i^{(s)}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\varphi}', \mathbf{u}^*) \quad (s = \overline{1, 4}), \quad (2.12)$$

позволяющие при определенном выборе функций $f_i^{(s)}$ выбрать вспомогательные линейные управляемые системы вида (2.5) из замкнутой системы дифференциальных уравнений (1.1), (1.2), (2.12). В этом случае множество индексов i в системе типа (2.5) будет зависеть от индекса s переменной η в знаменателе выражений (2.12). Так, индексу $s = 4$ соответствуют $i = 1, 2, 3$, индексу $s = 1$ соответствуют $i = 2, 3, 4$, и т.д.

2. "Назначение" уровней α_i^* вспомогательных управлений u_i^* . При этом числа α_i^* предопределяют соответствующее значение $\tau = t_1 - t_0$ времени переориентации твердого тела.

3. Проверка выполнимости заданных ограничений (2.3) для управляющих моментов u_i . При учете равенств (2.11) эту проверку можно осуществить на множестве состояний вспомогательной линейной системы дифференциальных уравнений (2.5), (2.9).

Заключение

Показано, что при наличии у нелинейной управляемой системы первого интеграла в построении линеаризующей обратной связи может возникнуть особенность, если процесс управления стартует из начального состояния, соответствующего нулевому значению первого интеграла.

Особенность сводится к тому, что линеаризующая обратная связь в данном случае может оказаться значительно проще и зависеть от меньшего числа фазовых координат системы.

В качестве примера рассмотрена нелинейная задача трехосной переориентации асимметричного твердого тела посредством трех маховиков (роторов), где указанная особенность в выборе линеаризующей обратной связи возникает в случае нулевых начальных значений угловой скорости тела и маховиков. В результате решение данной задачи удается получить посредством нелинейных управляющих моментов вида (2.6), которые не требуют знания текущих значений угловых скоростей маховиков.

Имея в виду, что точный старт из начального состояния, соответствующего нулевому значению первого интеграла, невозможен, в результате линеаризации посредством указанной более простой обратной связи приходим к некоторой "возмущенной" линейной системе. Таким образом, в качестве "платы" за использование более простой линеаризующей обратной связи получаем необходимость решения более сложной линейной задачи управления. Тем не менее, в ряде задач управления нелинейными системами такой подход может быть не только оправдан, но и целесообразен.

Отметим, что задачи переориентации трехроторного гиростата посредством управляющих моментов вида (2.4) при неконтролируемых внешних помехах рассмотрены в работах [15–17].

Список литературы

1. **Isidori A.** Nonlinear Control Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1985.
2. **Nijmeijer H., Van der Schaft A. J.** Nonlinear Control Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
3. **Marino R., Tomei P.** Nonlinear Control Systems Design. New York: Prentice-Hall, 1995.
4. **Agrachev A. A., Sachkov Yu. L.** Control Theory from the Geometric Viewpoint. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
5. **Краснощеченко В. И., Крищенко А. П.** Нелинейные системы: геометрические методы анализа и синтеза. М.: Изд-во МГТУ, 2005.

6. **Воротников В. И.** Устойчивость динамических систем по отношению к части переменных. М.: Наука, 1991.
7. **Vorotnikov V. I.** Partial Stability and Control. Boston: Birkhauser, 1998.
8. **Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
9. **Матюхин В. И.** Управление механическими системами. М.: Физматлит, 2009.
10. **Зубов В. И.** Лекции по теории управления. М.: Наука, 1975.
11. **Лурье А. И.** Аналитическая механика. М.: Физматлит, 1961.
12. **Филиппов А. Ф.** Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. М.: Наука, 1985.
13. **Воротников В. И.** Частичная устойчивость и управление: состояние проблемы и перспективы развития // Автоматика и телемеханика. 2005. № 4. С. 3–59.
14. **Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф.** Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983.
15. **Воротников В. И., Мартышенко Ю. Г.** К нелинейной задаче одноосной переориентации трехроторного гиростата при игровой модели помех // Автоматика и телемеханика. 2012. № 9. С. 35–48.
16. **Воротников В. И., Мартышенко Ю. Г.** К нелинейной задаче трехосной переориентации трехроторного гиростата при игровой модели помех // Космические исследования. 2013. Т. 51. Вып. 5. С. 412–418.
17. **Воротников В. И., Мартышенко Ю. Г.** К задаче переориентации трехроторного гиростата при неконтролируемых внешних помехах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 6. С. 414–419.

Concerning the Problem of the Exact Feedback Linearization of the Nonlinear Control Systems

V. I. Vorotnikov, vorot@ntiustu.ru✉, **A. V. Vokhmyanina**,
Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

Corresponding author: **Vorotnikov Vladimir I.**, D. Sc. (Phys. & Math.), Professor,
Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation,
Phone: (3435) 25-67-22 (office), e-mail: vorot@ntiustu.ru

Received on June 20, 2016

Accepted on July 04, 2016

The article studies the problem of the exact feedback linearization of the nonlinear control systems. This is a problem how to use the feedback controls in order to modify the original internal dynamics of a controlled system in such a way as to obtain to same behavior of certain prescribed autonomous linear systems. It presents possibilities of a successful selection of the linearizing feedback from the structure form of the initial nonlinear control system, as well as from the considered domain of the phase state. In this article the authors present a specific feature of construction of a linearizing feedback, when the initial nonlinear control system has the first integral and the control process takes start from the initial state where this first integral equals to zero. As an example a problem of three-axis reorientation of a rigid spacecraft was considered. Three reaction wheels were employed to produce the necessary torque in the axes of the initial. The controlling moments, applied to the flywheels, were offered to be generated by means of a feedback in the form of nonlinear functions of the phase variables of the considered nonlinear controlled system of differential equations, including dynamic Euler equations and kinematic equations in Rodrigues-Hamilton variables (in terms of the quaternion). As a result, the solution to the original nonlinear problem was narrowed down to the elementary linear control problems. The above-mentioned peculiarity in construction of the linearizing feedback takes place in this problem, when the initial angular velocities of the spacecraft and reaction wheels equal to zero.

Keywords: peculiarity of construction of a linearizing feedback for the nonlinear control systems, three-rotor gyrostatt re-orientation

For citation:

Vorotnikov V. I., Vokhmyanina A. V. Concerning the Problem of the Exact Feedback Linearization of the Nonlinear Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 3–7.

DOI: 10.17587/mau.18.3-7

References

1. **Isidori A.** Nonlinear Control Systems, Berlin, Springer-Verlag, 1985.
2. **Nijmeijer H., Van der Schaft A. J.** Nonlinear Control Systems, Berlin, Springer-Verlag, 1990.

3. Marino R., Tomei P. Nonlinear Control Systems Design, New York, Prentice-Hall, 1995.

4. Agrachev A. A., Sachkov Yu. L. Control Theory from the Geometric Viewpoint, Berlin, Springer-Verlag, 2004.

5. Krasnoshetchenko V. I., Krischenko A. P. *Nelineinye sistemy: Geometricheskie metody analiza i sinteza* (Nonlinear Systems: Geometric Methods of Analysis and Synthesis), Moscow, Bauman State Technical University Press, 2005 (in Russian).

6. Vorotnikov V. I. *Ustoichivost' dinamicheskikh sistem po otosheniyu k chasti peremennykh* (Stability of Dynamical Systems with Respect to a Part of the Variables), Moscow, Nauka, 1991 (in Russian).

7. Vorotnikov V. I. Partial Stability and Control, Boston, Birkhauser, 1998.

8. Fradkov A. L., Miroshnik I. V., Nikiforov V. O. Nonlinear and Adaptive Control of Complex Systems, Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 1999.

9. Matyukhin V. I. *Upravlenie mekhanicheskimi sistemami* (Control of Mechanical Systems), Moscow, Fizmatlit, 2009 (in Russian).

10. Zubov V. I. Theorie de la Commande, Moscow, Mir, 1978.

11. Lurie A. I. Analytical Mechanics, Berlin, Springer-Verlag, 2002.

12. Filippov A. F. Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides, Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 1988.

13. Vorotnikov V. I. Partial Stability and Control: the State of the Art and Developing Prospects, *Automation and Remote Control*, 2005, vol. 66, no. 4, pp. 511–561.

14. Pontryagin L. S., Boltyanskii V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F. The Mathematical Theory of Optimal Processes, New York, Interscience, 1962.

15. Vorotnikov V. I., Martysenko Yu. G. On the Nonlinear Uniaxial Reorientation Problem for a Three-Rotor Gyrostat in the Game Noise Model, *Automation and Remote Control*, 2012, vol. 73, no. 9, pp. 1469–1480.

16. Vorotnikov V. I., Martysenko Yu. G. On the Nonlinear Problem of Three-Axis Reorientation of a Three-Rotor Gyrostat in the Game Noise Model, *Cosmic Research*, 2013, vol. 51, no. 5, pp. 372–378.

17. Vorotnikov V. I., Martysenko Yu. G. *K probleme pereorientatsii trekh-rotornogo girostata pri nekontroliruemyykh vneshnikh pomekhakh* (To Problem of Three-Rotor Gyrostat Reorientation under Uncontrolled External Disturbances), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control), 2016, vol. 17, no. 6, pp. 414–419 (in Russian).

УДК 621.518.52

DOI:10.17587/mau.18.7-21

В. В. Сизых¹, д-р техн. наук, проф., vszykh@yandex.ru,

Б. И. Шахтарин², д-р техн. наук, проф., shakhtarin@mail.ru, В. А. Шевцев¹, vshevtsev@inbox.ru,

¹Московский технологический университет (МИРЭА),

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Механизм срыва слежения в стохастических аналоговых системах фазовой автоподстройки первого и второго порядков*

На основе марковской модели фазовой автоподстройки частоты проведено исследование апостериорных характеристик входного широкополосного шума в процессе срыва слежения в аналоговой системе фазовой автоподстройки частоты. Показано, что срыв слежения вызван маловероятным событием — наличием продолжительного отрезка времени, на котором случайный процесс, описывающий шум, преимущественно сохраняет знак. Представлена математическая модель наиболее вероятных траекторий процесса срыва слежения в аналоговых стохастических системах фазовой автоподстройки первого и второго порядков в виде обыкновенных дифференциальных уравнений относительно переменных состояния системы. Показана эквивалентность подходов к нахождению наиболее вероятных траекторий срыва слежения на основе поиска максимума совместной плотности распределения вероятностей координат точек траектории и решения вариационной задачи. Представлена модель аномального шума, связанного с наличием срывов слежения. Предложена приближенная формула для описания спектральной плотности мощности аномального шума. Исследован процесс срыва слежения в системе фазовой автоподстройки с нелинейным звеном в петле обратной связи. Показано, что такие системы имеют улучшенные характеристики времени до срыва слежения по сравнению с традиционными. Предложено объяснение увеличения времени до срыва слежения при использовании нелинейного элемента в петле обратной связи. Предложены подходы к выбору вида нелинейности. Приведены данные для среднего времени до срыва слежения при различных видах нелинейности и параметрах системы автоподстройки.

Ключевые слова: фазовая автоподстройка частоты, срыв слежения, аномальный шум, фазовая ошибка, нелинейный элемент

Введение

В статье описан механизм срыва слежения в аналоговых системах фазовой автоподстройки (ФАП) первого и второго порядков при наличии широкополосного шума на входе.

В стохастических системах радиоавтоматики со счетным числом устойчивых точек равновесия (устойчивые фокусы на фазовой плоскости системы),

* Работа выполнена в рамках проекта № 1776 по заданию № 8.1776.2014/К на выполнение НИР в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Минобрнауки России (научный руководитель Б. И. Шахтарин).

к которым, в частности, относятся системы ФАП, под срывом слежения понимается переход системы из окрестности одного состояния равновесия в окрестность другого состояния равновесия. При этом, что характерно для ФАП, достаточно часто переход осуществляется не между соседними точками равновесия, т.е. во время срыва слежения может происходить приращение ошибки слежения по фазе на величину $2\pi k$, $k = \pm 1, \pm 2, \dots$

Различные аспекты анализа вероятностных характеристик времени до срыва слежения в подобных системах рассматривались в большом числе работ, например, в работах [1–8]. Характеристики

времени до срыва слежения являются наиболее важными, так как при наличии таких срывов возникают аномальные фазовые ошибки, обусловленные достаточно быстрым "ступенчатым" изменением фазовой ошибки на величину, близкую к $2\pi k$. При этом явлении характерно изменение во времени производной фазовой ошибки (ошибки по частоте) в форме относительно короткого ярко выраженного импульса. Известны различные модели данного явления, например, модель Райса. Исследование одной из таких моделей приведено в работе [1]. Однако эти модели носят описательный характер, не вскрывая особенности поведения случайного шума на входе ФАП, приводящего к срыву слежения. Например, не исследовался вопрос: является ли срыв слежения результатом кратковременного выброса шума с большим абсолютным значением или это относительно продолжительное действие шума, имеющего однополярные значения? Исследовав механизм этого явления, рассмотрев характерные траектории движения системы на фазовой плоскости, можно в дальнейшем предложить способы увеличения среднего времени до срыва слежения.

1. Срыв системы фазовой автоподстройки частоты первого порядка

Поставим перед собой задачу найти наиболее вероятную траекторию срыва слежения системы ФАП первого порядка. Срывом слежения будем считать состояние системы, при котором фазовая ошибка x достигает заданной границы, например ближайшего состояния неустойчивого равновесия. Дифференциальное уравнение, описывающее работу системы ФАП первого порядка при воздействии шума, имеет стандартный вид в форме Ланжевена [2]:

$$\frac{dx}{dt} = \beta - \sin x + \sqrt{\frac{2}{r}} n(t) \quad (1)$$

или в форме стохастического дифференциального уравнения (ДУ)

$$dx = (\beta - \sin x)dt + \sqrt{\frac{2}{r}} d\omega_t(t), \quad (2)$$

где x — фазовая ошибка; β — начальная расстройка по частоте между сигналом управляемого генератора и полезным входным сигналом; r — отношение сигнал/шум в линеаризованной системе; $n(t)$ — стандартный белый шум (с единичной математической спектральной плотностью мощности); ω_t — стандартный винеровский случайный процесс.

Устойчивые состояния равновесия системы (2) находятся в точках $x_k = \arcsin\beta + 2\pi k$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), а неустойчивые — в точках $x_m = \pi m + \arcsin\beta$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$).

Воспользовавшись методом Эйлера численного решения стохастических ДУ, перейдем от диффе-

ренциального уравнения в непрерывном времени (2) к уравнению в дискретном времени:

$$x_i = x_{i-1} + \beta\Delta t - \sin x_{i-1}\Delta t + \sqrt{\frac{2\Delta t}{r}} n_i, \quad (3)$$

где n_i — отсчеты стандартного (с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией) дискретного белого гауссовского шума; x_i — значение фазовой ошибки в момент времени $t_i = i\Delta t$, Δt — шаг дискретизации.

Будем считать, что в начальный момент случайный процесс, заданный уравнением (3), находится в точке устойчивого равновесия $x_0 = \arcsin\beta$ и за N шагов достигает ближайшего неустойчивого положения равновесия $x_N = \arcsin\beta + \pi$, т.е. пусть за N шагов произойдет срыв слежения. Найдем совместную плотность распределения вероятностей (ПРВ) значений данного случайного процесса за N шагов $W_{X_1 \dots X_N}(x_1, \dots, x_N | x_0)$. Учитывая, что x_i является марковской последовательностью, совместную ПРВ с учетом (3) можно записать в виде

$$\begin{aligned} & W_{X_1 \dots X_N}(x_1, \dots, x_N | x_0) = \\ & = W_{X_N | X_{N-1}}(x_N | x_{N-1}) W_{X_{N-1} | X_{N-2}}(x_{N-1} | x_{N-2}) \dots \\ & \dots W_{X_2 | X_1}(x_2 | x_1) W_{X_1}(x_1 | x_0) = \\ & = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\sum_{i=1}^N \frac{[x_i - m_i]^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (4) \end{aligned}$$

где $m_i = x_{i-1} + \beta\Delta t - \sin x_{i-1}\Delta t$; $\sigma^2 = 2\Delta t/r$.

Наиболее вероятная траектория срыва слежения соответствует тем значениям x_i , $i = \overline{1, N}$, при которых ПРВ (4) достигает максимального значения. Заметим, что ПРВ (4) имеет наибольшее значение, когда слагаемое в показателе экспоненты минимально, поэтому найдем значения x_i , $i = \overline{1, N}$, при которых

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \frac{[x_i - m_i]^2}{2\sigma^2} = \\ & = \frac{r}{4} \sum_{i=1}^N \left[\frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} - \beta + \sin x_{i-1} \right]^2 \Delta t \rightarrow \min. \quad (5) \end{aligned}$$

Множитель $r/4$ не влияет на положение точки максимума ПРВ, поэтому его можно опустить. Чтобы найти максимум ПРВ, продифференцируем сумму (5) по всем аргументам и приравняем частные производные к нулю:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{i=1}^N \left[\frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} - \beta + \sin x_{i-1} \right]^2 \Delta t = \\ & = 2 \left[\frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} - \beta + \sin x_{i-1} \right] + \\ & + 2 \left[\frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} - \beta + \sin x_i \right] [-1 + \cos x_i \Delta t] = 0. \end{aligned}$$

Преобразуем это выражение и разделим его правую и левую часть на Δt :

$$\frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{\Delta t^2} + \frac{\sin x_i - \sin x_{i-1}}{\Delta t} - \frac{x_{i+1} \cos x_i - x_i \cos x_i}{\Delta t} + \beta \cos x_i - \frac{1}{2} \sin 2x_i = 0. \quad (6)$$

Перейдем в соотношении (6) к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$ и найдем обыкновенное ДУ, решением которого является наиболее вероятная траектория движения системы ФАП первого порядка:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \beta \cos x - \frac{1}{2} \sin 2x = 0. \quad (7)$$

В целях анализа наиболее вероятной траектории срыва слежения за время T для уравнения (7) необходимо рассматривать краевую задачу: $x(0) = \arcsin \beta$; $x(T) = \arcsin \beta + \pi$. В частном случае $\beta = 0$ имеем $x(0) = 0$; $x(T) = \pi$. Так как мы ставили перед собой задачу поиска наиболее вероятной траектории срыва, то время T должно равняться наиболее вероятному времени работы ФАП до срыва.

Уравнение (7) можно получить и вариационным способом. Перейдем к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, в результате выражение (5) преобразуется в интеграл

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=1}^N \left[\frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} - \beta + \sin x_{i-1} \right]^2 \Delta t = \int_0^T [\dot{x} - \beta + \sin x]^2 dt, \quad (8)$$

где $N = T/\Delta t$.

Таким образом, получили, что наиболее вероятная траектория срыва слежения является такой функцией $x(t)$, при которой интеграл (8) принимает наименьшее значение. Для выполнения этого условия нужно минимизировать функционал

$$\int_0^T F(\dot{x}, x, t) dt = \int_0^T [\dot{x} - \beta + \sin x]^2 dt. \quad (9)$$

Траектория срыва, при которой функционал (9) принимает наименьшее значение, находится по формуле Эйлера

$$\frac{\partial F}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial F}{\partial \dot{x}} = 0.$$

После вычисления частных производных, входящих в это уравнение, и упрощений получаем дифференциальное уравнение (7).

Интересно отметить, что мы также приходим к интегралу (9), решая следующую задачу. Будем рассматривать слагаемое с шумом $\sqrt{\frac{2}{r}} n(t)$ как некоторое воздействие, которое за время T переводит систему

из точки устойчивого равновесия в точку ближайшего неустойчивого равновесия. Найдем такую траекторию перехода между двумя этими точками, т. е. такую траекторию срыва ФАП, при которой энергия воздействия будет наименьшей. Выражение для энергии $n(t)$ найдем из уравнения (1):

$$E = \int_0^T \frac{2}{r} n^2(t) dt = \int_0^T [\dot{x} - \beta + \sin x]^2 dt.$$

Таким образом, получили, что наиболее вероятная траектория срыва соответствует такой траектории срыва, при которой энергия шума будет минимальной.

2. Наиболее вероятная траектория срыва ФАП второго порядка с пропорционально-интегрирующим фильтром

Найдем дифференциальное уравнение, описывающее наиболее вероятную траекторию срыва ФАП второго порядка с пропорционально-интегрирующим фильтром (ПИФ). Система стохастических дифференциальных уравнений, описывающих работу ФАП с ПИФ, имеет вид [2]

$$\begin{aligned} dy &= -\alpha_0^2 [y + (1-a)(\sin x - \beta)] dt + \sqrt{\frac{2}{r}} \alpha_0^2 (1-a) d\omega_y; \\ dx &= [y - a(\sin x - \beta)] dt + \sqrt{\frac{2}{r}} a d\omega_x, \end{aligned} \quad (10)$$

где α_0^2 — величина, обратная постоянной времени фильтра; a — коэффициент пропорциональности между постоянными времени фильтра. В данном случае будем считать, что произошел срыв слежения, если точка на фазовой плоскости системы (10) достигла сепаратрисы.

Решая систему (10) методом Эйлера, получим

$$\begin{aligned} y_i &= y_{i-1} - \alpha_0^2 [y_{i-1} + (1-a)(\sin x_{i-1} - \beta)] \Delta t + \\ &+ \sqrt{\frac{2\Delta t}{r}} \alpha_0^2 (1-a) n_i; \end{aligned} \quad (11)$$

$$x_i = x_{i-1} + [y_{i-1} - a(\sin x_{i-1} - \beta)] \Delta t + \sqrt{\frac{2\Delta t}{r}} a n_i,$$

где n_i — отсчеты стандартного дискретного белого гауссовского шума.

Как и ранее, будем считать, что в начальный момент случайный процесс, заданный системой (11), находится в точке устойчивого равновесия (x_0, y_0) и за N шагов достигает точки на сепаратрисе с координатами (x_N, y_N) . Найдем совместную ПРВ координат траектории движения при переходе из состояния (x_0, y_0) в состояние (x_N, y_N) $W(x_N, y_N, x_{N-1}, y_{N-1}, \dots, x_1, y_1 | x_0, y_0)$.

Из соотношения (11) найдем условные математические ожидания и дисперсии y_i и x_i , а также коэф-

коэффициент корреляции, при условии что x_{i-1} и y_{i-1} имеют фиксированные значения:

$$\begin{aligned} m_{y_i|x_{i-1};y_{i-1}} &= \\ &= y_{i-1} - \alpha_0^2 [y_{i-1} + (1-a)(\sin x_{i-1} - \beta)]\Delta t; \\ m_{x_i|x_{i-1};y_{i-1}} &= x_{i-1} + [y_{i-1} - a(\sin x_{i-1} - \beta)]\Delta t; \\ \sigma_{y_i|x_{i-1};y_{i-1}}^2 &= \frac{2\Delta t}{r} \alpha_0^4 (1-a)^2; \\ \sigma_{x_i|x_{i-1};y_{i-1}}^2 &= \frac{2\Delta t}{r} a^2; \\ \rho_{x_i y_i|x_{i-1};y_{i-1}} &= 1. \end{aligned} \quad (12)$$

Используя свойство марковости случайной последовательности (11), совместную ПРВ можно записать в виде

$$\begin{aligned} W(x_N, y_N, x_{N-1}, y_{N-1}, \dots, x_1, y_1|x_0, y_0) &= \\ &= \prod_{i=1}^N W(x_i, y_i|x_{i-1}, y_{i-1}). \end{aligned} \quad (13)$$

Рассмотрим отдельный множитель, входящий в произведение (13). По правилу умножения вероятностей имеем

$$\begin{aligned} W(x_i, y_i|x_{i-1}, y_{i-1}) &= \\ &= W(y_i|x_{i-1}, y_{i-1}) W(x_i|y_i, x_{i-1}, y_{i-1}). \end{aligned}$$

Так как случайные величины x_i и y_i суть линейное преобразование нормальной случайной величины n_i , то они являются нормальными.

Условная плотность распределения вероятностей $W(y_i|x_{i-1}, y_{i-1})$ равна

$$\begin{aligned} W(y_i|x_{i-1}, y_{i-1}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{y_i|x_{i-1};y_{i-1}}^2}} \times \\ &\times \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{y_i|x_{i-1};y_{i-1}}^2} [y_i - m_{y_i|x_{i-1};y_{i-1}}]^2\right\} = \\ &= \sqrt{\frac{r}{4\pi\Delta t\alpha_0^4(1-a)^2}} \exp\left\{-\frac{r}{4\alpha_0^4(1-a)^2} \left[\frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta t} + \right. \right. \\ &\left. \left. + \alpha_0^2 y_{i-1} + \alpha_0^2(1-a)(\sin x_{i-1} - \beta)\right]^2 \Delta t\right\}. \end{aligned}$$

Выражения для условных математического ожидания и дисперсии для нормального распределения известны и после преобразования с учетом (12) примут вид

$$\begin{aligned} m_{x_i|y_i, x_{i-1}, y_{i-1}} &= \\ &= m_{x_i|x_{i-1};y_{i-1}} + \rho \frac{\sigma_{x_i|x_{i-1};y_{i-1}}}{\sigma_{y_i|x_{i-1};y_{i-1}}} (y_i - m_{y_i|x_{i-1};y_{i-1}}) = \\ &= x_{i-1} + y_{i-1}\Delta t + \frac{a}{\alpha_0^2(1-a)} (y_i - y_{i-1} + \alpha_0^2 y_{i-1}\Delta t); \\ \sigma_{x_i|y_i, x_{i-1}, y_{i-1}}^2 &= (1 - \rho^2)\sigma_{x_i|x_{i-1};y_{i-1}}^2 = 0. \end{aligned}$$

Так как условная дисперсия $\sigma_{x_i|y_i, x_{i-1}, y_{i-1}}^2$ равна нулю, имеем

$$W(x_i|y_i, x_{i-1}, y_{i-1}) = \delta(x_i - m_{x_i|y_i, x_{i-1}, y_{i-1}}),$$

где $\delta(x)$ — функция Дирака.

Тогда совместную ПРВ (13) координат траектории срыва можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} W(x_N, y_N, \dots, x_1, y_1|x_0, y_0) &= \\ &= \prod_{i=1}^N W(y_i|x_{i-1}, y_{i-1}) W(x_i|y_i, x_{i-1}, y_{i-1}) = \\ &= \prod_{i=1}^N \sqrt{\frac{r}{4\pi\Delta t\alpha_0^4(1-a)^2}} \delta(x_i - m_{x_i|y_i, x_{i-1}, y_{i-1}}) \times \\ &\times \exp\left\{\frac{r}{4\alpha_0^4(1-a)^2} \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta t} + \alpha_0^2 y_{i-1} + \right. \right. \\ &\left. \left. + \alpha_0^2(1-a)(\sin x_{i-1} - \beta)\right]^2 \Delta t\right\}. \end{aligned}$$

Так как в данное выражение входит произведение функций Дирака, то совместная ПРВ не равна нулю только при условии

$$x_i = m_{x_i|y_i, x_{i-1}, y_{i-1}} \quad \text{при } i = \overline{1, N},$$

или

$$x_i = x_{i-1} + y_{i-1}\Delta t + \frac{a}{\alpha_0^2(1-a)} (y_i - y_{i-1} + \alpha_0^2 y_{i-1}\Delta t).$$

Преобразуя это выражение, получим

$$\alpha_0^2(1-a) \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} - \alpha_0^2 y_{i-1} = a \frac{y_{i-1} - y_i}{\Delta t}. \quad (14)$$

Как и для ФАП первого порядка, наиболее вероятная траектория срыва слежения соответствует тем значениям $x_i, y_i, i = \overline{1, N}$, при которых совместная ПРВ (13) достигает максимального значения. Совместная ПРВ достигает максимума, когда минимальна сумма в показателе экспоненты

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta t} + \alpha_0^2 y_{i-1} + \right. \\ \left. + \alpha_0^2(1-a)(\sin x_{i-1} - \beta)\right]^2 \Delta t \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (15)$$

Переходя в соотношениях (14) и (15) к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получаем, что для нахождения наиболее вероятной траектории срыва ФАП нужно найти минимум функционала

$$\begin{aligned} &\int_0^T F(\dot{y}, y, \dot{x}, x, t) dt = \\ &= \int_0^T [\dot{y} + \alpha_0^2 y + \alpha_0^2(1-a)(\sin x - \beta)]^2 dt \end{aligned} \quad (16)$$

при условии

$$\alpha_0^2(1-a)\dot{x} - \alpha_0^2 y - \dot{y}a = 0. \quad (17)$$

Воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа. Умножим условие (17) на множитель Лагранжа $\lambda(t)$ и прибавим к $F(\dot{y}, y, \dot{x}, x, t)$. В результате получим новый функционал

$$\int_0^T G(\dot{y}, y, \dot{x}, x, t)dt = \int_0^T F(\dot{y}, y, \dot{x}, x, t) + \lambda(t)[\alpha_0^2(1-a)\dot{x} - \alpha_0^2 y - \dot{y}a]dt. \quad (18)$$

Чтобы получить наиболее вероятную траекторию срыва, нужно найти минимум функционала (18), решая систему

$$\frac{\partial G}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial G}{\partial \dot{x}} = 0;$$

$$\frac{\partial G}{\partial y} - \frac{d}{dt} \frac{\partial G}{\partial \dot{y}} = 0.$$

В результате получаем систему из трех обыкновенных ДУ:

$$\dot{x} = \frac{1}{\alpha_0^2(1-a)} [\alpha_0^2 y + a\dot{y}];$$

$$\dot{\lambda}(t) = 2[\dot{y} + \alpha_0^2 y + \alpha_0^2(1-a)(\sin x - \beta)]\cos x; \quad (19)$$

$$\ddot{y} = \alpha_0^2 y + \alpha_0^4(1-a)(\sin x - \beta) - \alpha_0^2(1-a)\dot{x}\cos x + \frac{a}{2}\dot{\lambda}(t) - \frac{\alpha_0^2}{2}\lambda(t).$$

Преобразуем систему (19) с учетом (10) и в итоге получим систему дифференциальных уравнений, решением которой является наиболее вероятная траектория срыва ФАП второго порядка с пропорционально-интегрирующим фильтром

$$\dot{x} = \frac{1}{\alpha_0^2(1-a)} [\alpha_0^2 y + a\dot{y}];$$

$$\dot{\lambda}(t) = 2[\dot{y} + \alpha_0^2 y + \alpha_0^2(1-a)(\sin x - \beta)]\cos x; \quad (20)$$

$$\ddot{y} = \alpha_0^4 y + \alpha_0^4(1-a)(\sin x - \beta) + \alpha_0^2(1-a)\cos x[as\sin x - \alpha\beta - y] - \frac{\alpha_0^2}{2}\lambda(t).$$

Наиболее вероятную траекторию срыва для ФАП второго порядка с интегрирующим фильтром находим из уравнений (20), приравнявая $a = 0$.

3. Наиболее вероятная траектория срыва ФАП второго порядка с вырожденным пропорционально-интегрирующим фильтром

Система стохастических дифференциальных уравнений, описывающих работу ФАП с вырожденным ПИФ, имеет вид [2]

$$dy = -\alpha_0^2 \sin x dt + \sqrt{\frac{2}{r}} \alpha_0^2 d\omega_t; \quad (21)$$

$$dx = [y - a\sin x]dt + \sqrt{\frac{2}{r}} ad\omega_t.$$

Повторив рассуждения, проведенные ранее для ФАП с ПИФ, получим, что для нахождения наиболее вероятной траектории срыва нужно найти минимум функционала

$$\int_0^T F(\dot{y}, y, \dot{x}, x)dt = \int_0^T [\dot{y} + \alpha_0^2 \sin x]^2 dt$$

при условии

$$\alpha_0^2 \dot{x} - \alpha_0^2 y - a\dot{y} = 0.$$

Воспользовавшись, как и в предыдущем пункте, методом Эйлера нахождения минимума функционала и методом неопределенных множителей Лагранжа, получим систему из трех дифференциальных уравнений:

$$\dot{x} = y + \frac{a}{\alpha_0^2} \dot{y};$$

$$\dot{\lambda}(t) = 2[\dot{y} + \alpha_0^2 \sin x]\cos x; \quad (22)$$

$$\ddot{y} = \alpha_0^2 \cos x[as\sin x - y] - \frac{\alpha_0^2}{2}\lambda(t).$$

Для ФАП с ПИФ и вырожденным ПИФ для анализа срыва слежения следует рассматривать крайнюю задачу для обыкновенных ДУ (20) — для ФАП с ПИФ (или ИФ) и (22) — для ФАП с вырожденным ПИФ с граничными условиями вида $x(0) = x_0$; $y(0) = y_0$; $x(T) = x_c$; $y(T) = y_c$, где (x_0, y_0) — точка устойчивого состояния равновесия (при $\beta = 0$ $(x_0, y_0) = (0, 0)$); (x_c, y_c) — точка на сепаратрисе, разделяющей области притяжения соседних устойчивых фокусов.

На рис. 1, а, б приведен пример зависимости фазовой ошибки и ошибки по частоте от времени для ФАП с ИФ при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$ и $\beta = 0$. Как видно из рис. 1, а, за данный промежуток времени происходит шесть срывов слежения. На рис. 2 и 3 приведено сравнение результатов имитационного моделирования срыва слежения в ФАП с ИФ с данными расчета наиболее вероятной траектории срыва слежения по формуле (20) при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$; $a = 0$; $\beta = 0$. В ходе имитационного моделирования

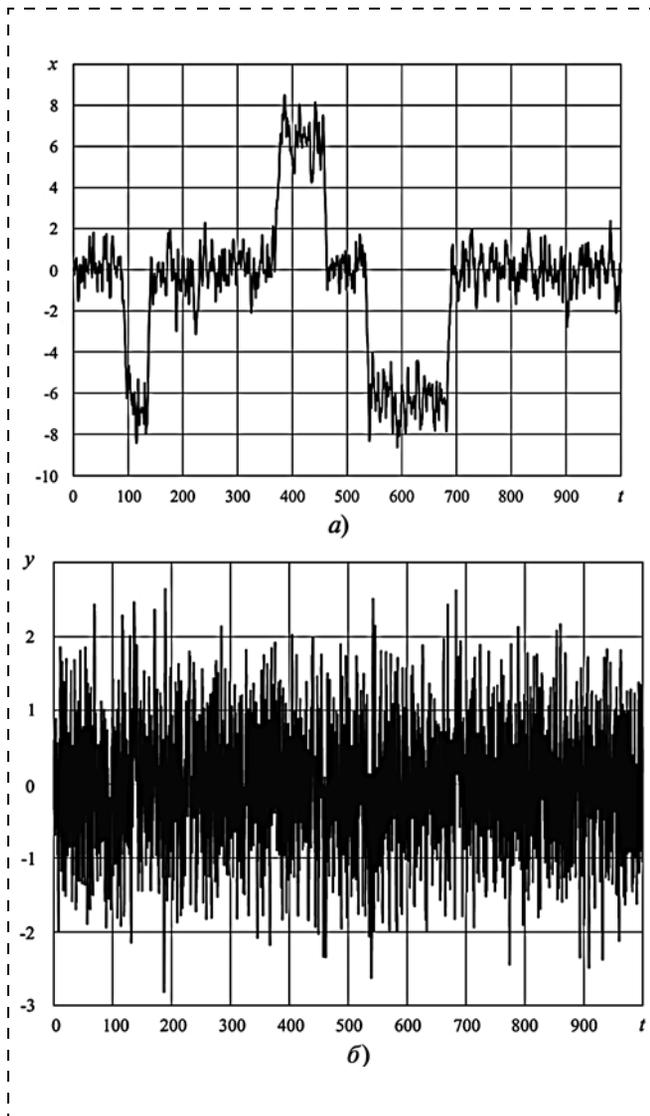


Рис. 1. Зависимость фазовой ошибки (а) и ошибки по частоте (б) от времени для ФАП с ИФ при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$; $\beta = 0$

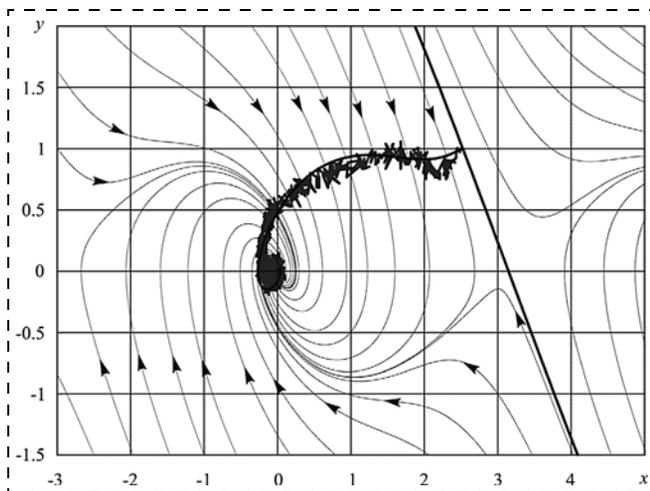


Рис. 2. Усредненная и наиболее вероятная траектории срыва слежения в ФАП с ИФ и на фазовой плоскости при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$; $\beta = 0$

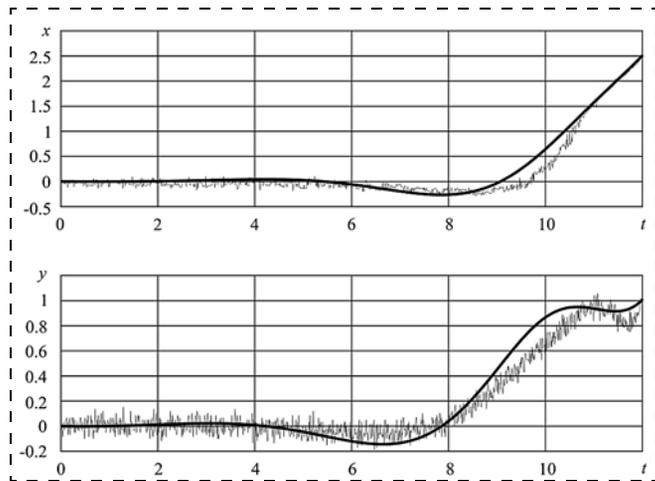


Рис. 3. Зависимости от времени усредненных и наиболее вероятных координат в пространстве состояний ФАП с ИФ при срыве слежения при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$; $\beta = 0$

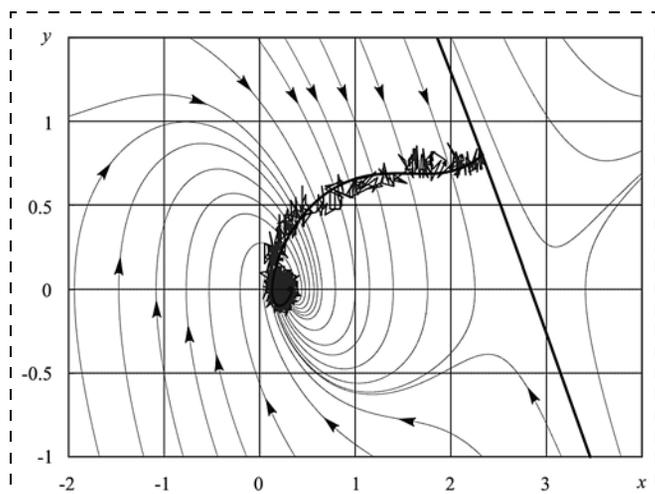


Рис. 4. Усредненная и наиболее вероятная траектории срыва слежения в ФАП с ИФ и на фазовой плоскости при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$; $\beta = 0,3$

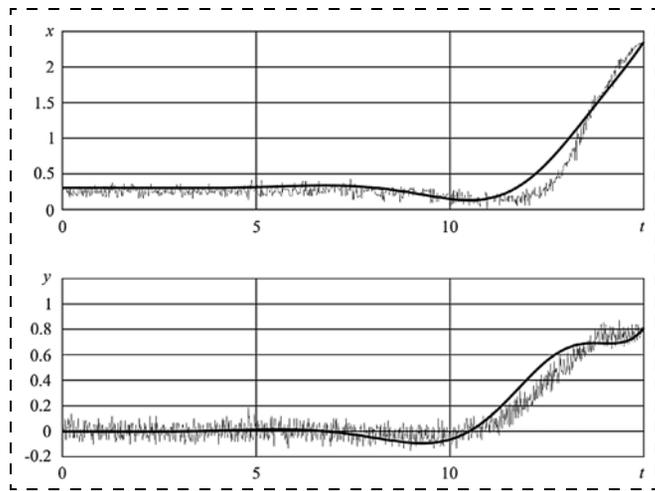


Рис. 5. Зависимости от времени усредненных и наиболее вероятных координат в пространстве состояний ФАП с ИФ при срыве слежения при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$; $\beta = 0,3$

путем численного решения системы стохастических ДУ (10) отбрасывались траектории, не попадающие в заданную окрестность точки (x_c, y_c) на сепаратрисе, оставшиеся траектории усреднялись. На рис. 3 показано изменение соответствующих координат движения системы во времени. Для выбранного значения $\alpha_0^2 = 1$ свойственен колебательный характер движения в окрестности устойчивого достаточно хорошо выраженного фокуса, что видно из рисунка.

На рис. 4 и 5 приведено сравнение результатов имитационного моделирования срыва слежения в ФАП с ИФ с данными расчета наиболее вероятной траектории срыва слежения по формуле (20) при $\alpha_0^2 = 1; r = 2; \beta = 0,3$. При увеличении α_0^2 колебательный характер движения становится менее вы-

раженным (при $\alpha_0^2 \rightarrow \infty$ характеристики ФАП с ИФ стремятся к характеристикам системы первого порядка), это также наблюдается в поведении наиболее вероятной траектории срыва слежения.

На рис. 6 и 7 приведены данные соответствующих расчетов для ФАП с ПИФ (20) при параметрах $\alpha_0^2 = 0,3; r = 2; \beta = 0; a = 0,3$. На рис. 8 и 9 приведены результаты расчетов для ФАП с вырожденным ПИФ при параметрах $\alpha_0^2 = 0,5; r = 5; a = 0,5$. В последнем случае для вычисления наиболее вероятной траектории использована система ДУ (22).

Приведенные расчеты показывают достаточное для инженерных расчетов совпадение результатов расчетов наиболее вероятных траекторий по формулам (20) и (22).

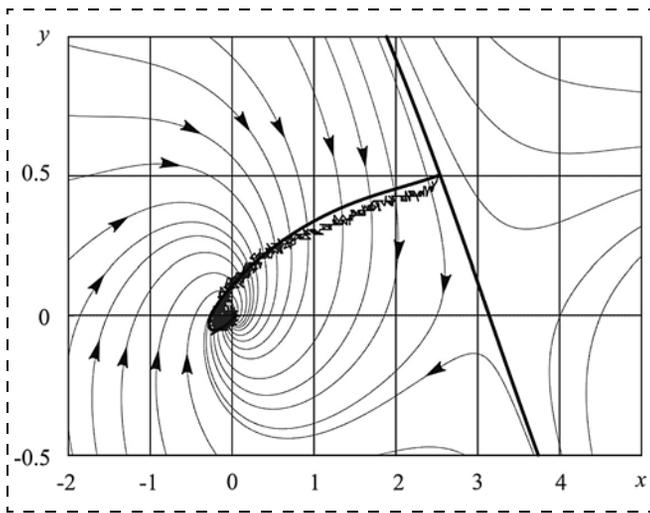


Рис. 6. Усредненная и наиболее вероятная траектории срыва слежения в ФАП с ПИФ и на фазовой плоскости при $\alpha_0^2 = 0,3; r = 2; \beta = 0; a = 0,3$

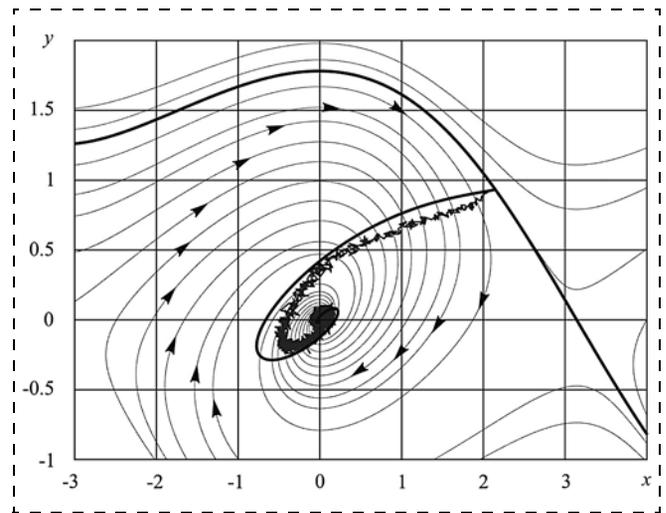


Рис. 8. Усредненная и наиболее вероятная траектории срыва слежения в ФАП с вырожденным ПИФ и на фазовой плоскости при $\alpha_0^2 = 0,5; r = 5; \beta = 0; a = 0,5$

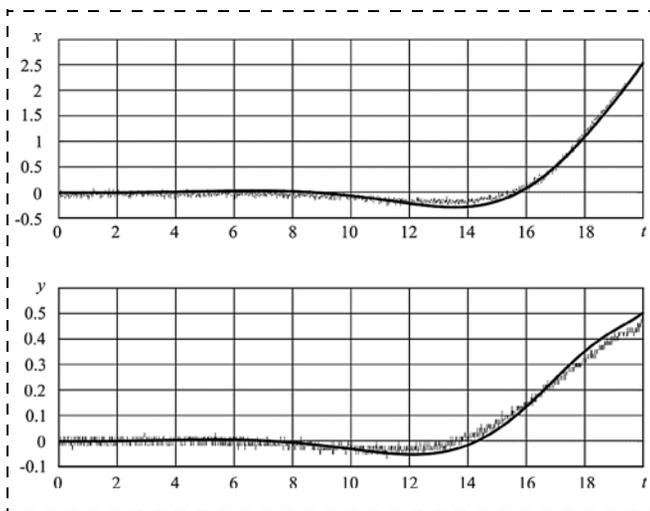


Рис. 7. Зависимости от времени усредненных и наиболее вероятных координат в пространстве состояний ФАП с ПИФ при срыве слежения при $\alpha_0^2 = 0,3; r = 2; \beta = 0; a = 0,3$

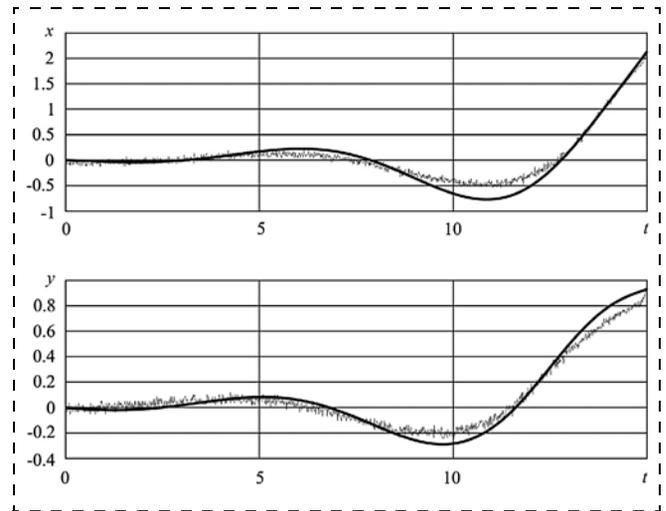


Рис. 9. Зависимости от времени усредненных и наиболее вероятных координат в пространстве состояний ФАП с вырожденным ПИФ при срыве слежения при $\alpha_0^2 = 0,5; r = 5; \beta = 0; a = 0,5$

Анализ шума на входе ФАП в момент срыва слежения (в сторону увеличения фазовой ошибки) на основании данных имитационного моделирования показывает, что значения отсчетов шума концентрируются в положительной области так, что на протяжении движения точки на фазовой плоскости к сепаратрисе координата $y(t)$ оказывается положительной. Поскольку для интегрирующего фильтра $y(t)$ имеет смысл производной фазовой ошибки (ошибки по частоте), то фазовая ошибка при этом возрастает. Траектория пересекает сепаратрису и концентрируется в окрестности новой точки равновесия системы.

Если модификацией алгоритма работы ФАП ограничить возможные значения координаты $y(t)$, то следует ожидать замедление времени движения к сепаратрисе вдоль оси x , что должно уменьшить вероятность события, заключающегося в нахождении в течение относительно длительного времени шума на входе в положительной области и, в результате, возможно увеличение среднего времени до срыва слежения.

4. Спектральная плотность мощности anomального шума

При приеме сигнала с частотной модуляцией часто применяется демодулятор с ФАП [9—11]. В этом случае основная трудность, возникающая при вычислении рабочей характеристики демодулятора, заключается в сложности расчета спектральной плотности мощности (СПМ) частотной ошибки (шума) на выходе фильтра демодулятора.

Проведем расчет СПМ шума для упрощенного случая линеаризованной модели ФАП с интегрирующим фильтром, полученной с помощью разложения нелинейных функций системы (10) в ряд Тейлора и отбрасывания всех членов выше первого порядка. Для простоты будем считать, что начальная расстройка между частотой сигнала и гетеродина $\beta = 0$, тогда система уравнений примет вид

$$\begin{aligned} dy &= -\alpha_0^2 [y + x]dt + \sqrt{\frac{2}{r}} \alpha_0^2 d\omega_i; \\ dx &= ydt. \end{aligned} \quad (23)$$

Выражая y из второго уравнения и подставляя в первое, перейдем от системы уравнения к одному уравнению второго порядка

$$\ddot{x} = -\alpha_0^2 [\dot{x} + x] + \sqrt{\frac{2}{r}} \alpha_0^2 n(t), \quad (24)$$

где $n(t)$ — стандартный белый гауссовский шум с единичной СПМ. Из уравнения (24) легко получить СПМ фазовой ошибки

$$|S_x(i\omega)|^2 = \frac{2\alpha_0^4}{r[\omega^4 + \omega^2(\alpha_0^4 - 2\alpha_0^2) + \alpha_0^4]}.$$

Отсюда с учетом второго уравнения системы (23) находим СПМ частотной ошибки, т. е. СПМ шума на выходе фильтра демодулятора

$$|S_y(i\omega)|^2 = \frac{2\alpha_0^4 \omega^2}{r[\omega^4 + \omega^2(\alpha_0^4 - 2\alpha_0^2) + \alpha_0^4]}. \quad (25)$$

В работе [10] отмечалось, что шум на выходе фильтра демодулятора можно представить как сумму двух шумовых процессов: нормального шума, обусловленного колебанием ФАП вблизи положения устойчивого равновесия, и anomального шума, возникающего в результате срывов слежения. В линеаризованной модели ФАП существует единственное положение устойчивого равновесия, поэтому в ней не происходят срывы слежения и составляющая anomального шума отсутствует.

На рис. 10 представлено сравнение СПМ шума, полученной с помощью имитационного моделирования системы уравнений (10) ($a = 0, \beta = 0$)

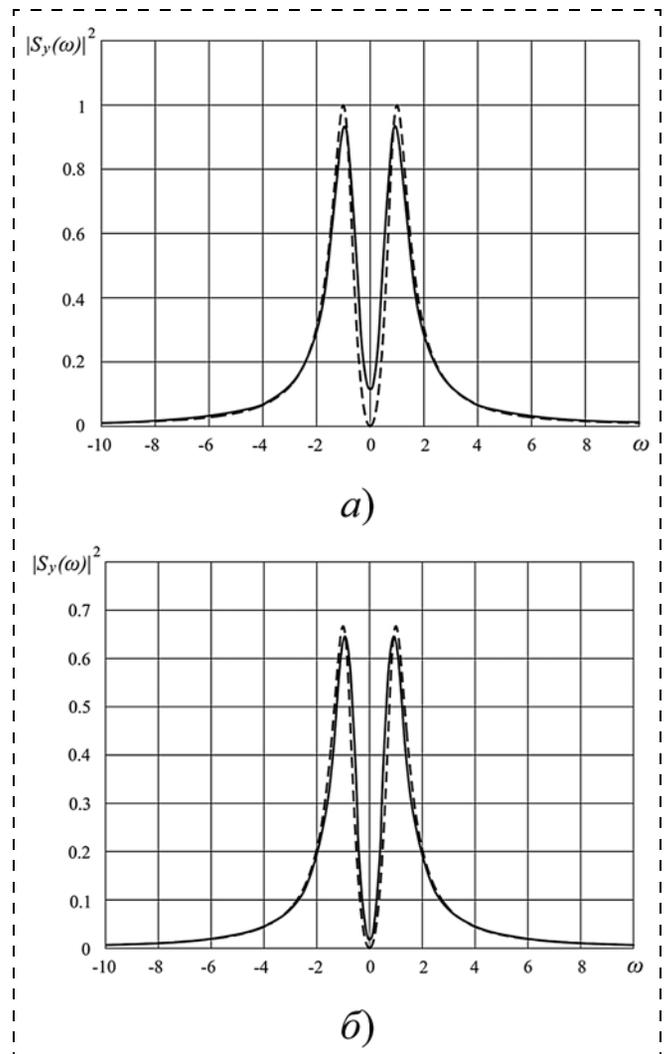


Рис. 10. Спектральная плотность мощности частотной ошибки при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$ (а) и $r = 3$ (б)

(сплошная кривая), с СПМ линеаризованной модели, найденной из уравнения (25) (штриховая кривая), при $\alpha_0^2 = 1$, $r = 2$ (а) и $r = 3$ (б).

Как видно из рис. 10, б, при $r = 3$ результаты достаточно хорошо совпадают между собой. Это связано с тем, что при больших значениях r возникновение срыва слежения является очень редким событием, поэтому аномальный шум можно не учитывать, так как мощность его мала. При уменьшении r составляющая аномального шума становится существенной, поэтому на рис. 10, а наблюдается некоторое расхождение результатов.

Ранее были предложены различные модели аномального шума. Например, в модели Райса [11] аномальный шум представляется в виде последовательности дельта-импульсов с периодом, равным среднему времени до срыва слежения, а в модели Хесса [12] в качестве аномального шума рассматривалась последовательность гауссовских импульсов. В этих моделях форму импульсов выбирали произвольно, руководствуясь соображениями удобства дальнейших вычислений.

Исходя из результатов, полученных ранее, предложим новую модель аномального шума. Выше нами была получена система ДУ (20), решением которой является наиболее вероятная траектория срыва слежения. Пользуясь данной системой, можно также найти наиболее вероятную траекторию перехода из одного состояния устойчивого равновесия в соседнее состояние устойчивого равновесия. Для этого следует рассматривать краевую задачу для системы ДУ (20) с граничными условиями вида $x(0) = x_1$; $y(0) = y_1$; $x(T) = x_2$; $y(T) = y_2$, где (x_1, y_1) и (x_2, y_2) — точки устойчивого состояния равновесия. Для ФАП с ИФ при $\beta = 0$ имеем $(x_1, y_1) = (0, 0)$ и $(x_2, y_2) = (2\pi, 0)$. В данном случае время T должно равняться наиболее вероятному времени перехода из одного состояния устойчивого равновесия в соседнее.

Зависимости фазовой и частотной ошибок от времени, полученные с помощью решения системы ДУ (20) при $a = 0$, $\beta = 0$, $\alpha_0^2 = 1$ с описанными ранее граничными условиями, приведены на рис. 11 (сплошные кривые). Таким образом, мы получили наиболее вероятную форму импульса частотной ошибки, который возникает при срыве слежения. Данный импульс возможно аппроксимировать двумя релейскими импульсами, заданными выражением

$$y_p(t) = \frac{\pi t}{D} e^{-\frac{t^2}{2D}} + \frac{\pi(T-t)}{D} e^{-\frac{(T-t)^2}{2D}}, \quad (26)$$

где $t \in [0, T]$;

$$D = \frac{0,4T}{\sqrt[3]{\alpha_0^2}}.$$

Проинтегрировав $y_p(t)$, получим аппроксимирующую формулу для фазовой ошибки:

$$x_p(t) = -e^{-\frac{t^2}{2D}} + e^{-\frac{(T-t)^2}{2D}} + \pi \left(1 - e^{-\frac{T^2}{2D}} \right). \quad (27)$$

Зависимости фазовой и частотной ошибок от времени, найденные с помощью выражений (27) и (26), также приведены на рис. 11 (штриховые кривые).

Таким образом, будем считать, что аномальный шум представляет собой последовательность импульсов, форма которых определяется выражением (26), длительность импульсов равна наиболее вероятному времени до срыва слежения, а период следования равен среднему времени до срыва слежения.

В этом случае СПМ аномального шума при $\alpha_0^2 = 1$ и $r = 2$ имеет вид, приведенный на рис. 12. На рис. 13 приведена СПМ частотной ошибки,

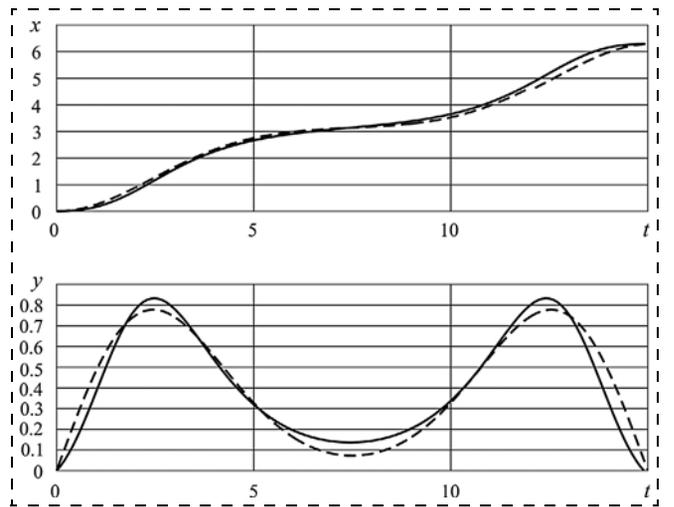


Рис. 11. Зависимости от времени наиболее вероятных координат в пространстве состояний ФАП с ИФ при переходе в соседнее состояние устойчивого равновесия при $\alpha_0^2 = 1$

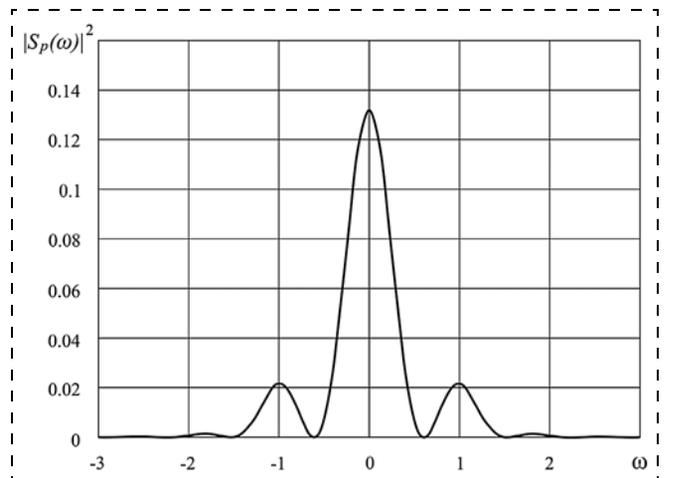


Рис. 12. Спектральная плотность мощности аномального шума ФАП с ИФ при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$

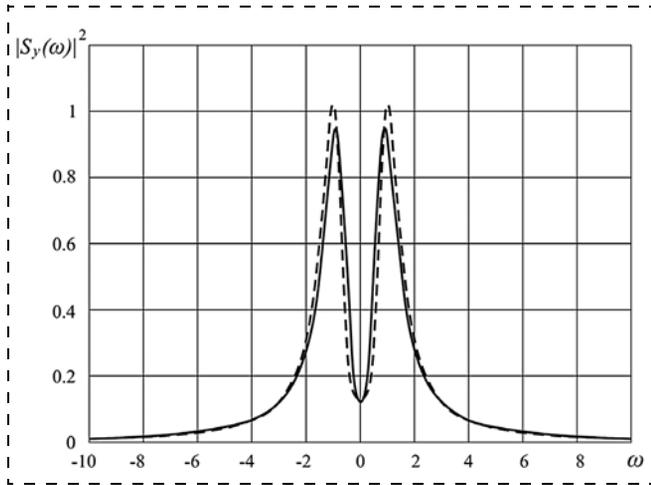


Рис. 13. Спектральная плотность мощности частотной ошибки ФАП с ИФ с учетом аномального шума при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$

полученная с помощью имитационного моделирования системы уравнений (10) (сплошная кривая), и сумма СПМ линеаризованной модели и СПМ аномального шума (штриховая кривая) при $\alpha_0^2 = 1$, $r = 2$. Как видно из рис. 13, при использовании предложенной модели получено хорошее совпадение теоретических и практических результатов.

5. Наиболее вероятная траектория срыва слежения в ФАП второго порядка с интегрирующим фильтром и нелинейным звеном в петле обратной связи

Как указывалось в предыдущих пунктах, наличие нелинейности в петле обратной связи должно приводить к увеличению среднего времени до срыва слежения. Этот эффект отмечался в работах [8, 9], хотя механизм данного явления стал понятен лишь сейчас.

Найдем дифференциальное уравнение, описывающее наиболее вероятную траекторию срыва ФАП частоты второго порядка с интегрирующим фильтром и нелинейным фильтром в петле обратной связи перед управляемым генератором.

Система дифференциальных уравнений, описывающих работу ФАП в этом случае, имеет вид [8]

$$dy = -\alpha_0^2(y + \sin x - \beta)dt + \sqrt{\frac{2}{r}} \alpha_0^2 d\omega; \quad (28)$$

$$dx = \beta - f(\beta - y)dt,$$

где $f(y)$ — некоторая нелинейная функция.

Повторив рассуждения, проведенные ранее, получим, что для нахождения наиболее вероятной траектории срыва нужно найти минимум функционала

$$\begin{aligned} & \int_0^{\tau} F(\dot{y}, y, \dot{x}, x)dt = \\ & = \int_0^{\tau} [\dot{y} + \alpha_0^2 y + \alpha_0^2 \sin x - \alpha_0^2 \beta]^2 dt \end{aligned} \quad (29)$$

при условии

$$\dot{x} + f(\beta - y) - \beta = 0. \quad (30)$$

Применяя метод неопределенных множителей Лагранжа и метод Эйлера для задачи (29) с учетом (30), получим

$$\dot{\lambda}(t) - 2[\dot{y} + \alpha_0^2 y + \alpha_0^2 \sin x - \alpha_0^2 \beta] \alpha_0^2 \cos x = 0;$$

$$\begin{aligned} & 2[\ddot{y} + \alpha_0^2 \dot{y} + \alpha_0^2 \dot{x} \cos x] - 2[\dot{y} + \alpha_0^2 y + \\ & + \alpha_0^2 \sin x - \alpha_0^2 \beta] \alpha_0^2 + \lambda(t) \frac{\partial f(\beta - y)}{\partial y} = 0. \end{aligned}$$

Преобразуем эту систему уравнений и учтем условия (30):

$$\dot{x} = \beta - f(\beta - y);$$

$$\dot{\lambda}(t) = 2[\dot{y} + \alpha_0^2 y + \alpha_0^2 \sin x - \alpha_0^2 \beta] \alpha_0^2 \cos x;$$

$$\begin{aligned} & \ddot{y} + \alpha_0^2 \dot{x} \cos x - \alpha_0^4 y - \alpha_0^4 \sin x + \alpha_0^4 \beta + \\ & + \frac{1}{2} \lambda(t) \frac{\partial f(\beta - y)}{\partial y} = 0. \end{aligned}$$

После упрощения получим систему ДУ, решением которых является наиболее вероятная траектория срыва слежения:

$$\dot{x} = \beta - f(\beta - y); \quad (31)$$

$$\dot{\lambda}(t) = 2[\dot{y} + \alpha_0^2 y + \alpha_0^2 (\sin x - \beta)] \alpha_0^2 \cos x;$$

$$\begin{aligned} & \ddot{y} = \alpha_0^4 y + \alpha_0^4 (\sin x - \beta) - \alpha_0^2 \beta \cos x + \\ & + \alpha_0^2 f(\beta - y) \cos x - \frac{1}{2} \lambda(t) \frac{\partial f(\beta - y)}{\partial y} = 0. \end{aligned}$$

При $f(y) = y$ получаем уравнения ФАП второго порядка с интегрирующим фильтром.

В процессе вычислений были рассмотрены четыре типа нелинейных звеньев, со следующими характеристиками (рис. 14, $\eta = 1$):

$$f_a(x) = \begin{cases} x, & -\eta \leq x \leq \eta; \\ \eta, & \eta < x; \\ -\eta, & -\eta > x; \end{cases}$$

$$f_b(x) = \begin{cases} x, & -\eta \leq x \leq \eta; \\ 0, & \eta < x; \\ 0, & -\eta > x; \end{cases}$$

$$f_c(x) = \begin{cases} x, & -\frac{\eta}{2} \leq x \leq \frac{\eta}{2}; \\ -x + \eta, & \frac{\eta}{2} < x \leq \eta; \\ -x - \eta, & -\eta \leq x < -\frac{\eta}{2}; \\ 0, & \eta < x; \\ 0, & x < -\eta; \end{cases}$$

$$f_d(x) = \begin{cases} x, & -\frac{\eta}{2} \leq x \leq \frac{\eta}{2}; \\ -\frac{1}{2}x + \frac{3}{4}\eta, & \frac{\eta}{2} < x \leq \eta; \\ -\frac{1}{2}x - \frac{3}{4}\eta, & -\eta \leq x < -\frac{\eta}{2}; \\ \frac{1}{4}\eta, & \eta < x; \\ -\frac{1}{4}\eta, & x < -\eta. \end{cases}$$

Среднее время до первого срыва слежения, полученное в результате моделирования при $\alpha_0^2 = 1$, $r = 2$, $\beta = 0$ и различных типах нелинейных звеньев, приведено в табл. 1.

Отметим, что максимальное значение частотной ошибки y_{\max} для наиболее вероятной траектории срыва имеет значение, близкое к единице. На основании данных имитационного моделирования было также обнаружено, что значения частотной ошибки большинства траекторий срыва попадают в отрезок $[0; 2y_{\max}]$. Поэтому при $\eta > 2y_{\max}$ для нелинейных звеньев с характеристиками $f_a(x)$ и $f_b(x)$ и при $\eta > 4y_{\max}$ для нелинейных звеньев с характеристиками $f_c(x)$ и $f_d(x)$ значения частотной ошибки попадут на линейный участок характеристики нелинейности, а значит, он практически не будет оказывать влияние на среднее время до срыва. В этом можно убедиться, взглянув на табл. 1.

В табл. 2 приведена зависимость среднего времени до срыва слежения в ФАП с нелинейным звеном в петле обратной связи от β и η при $\alpha_0^2 = 1$, $r = 2$.

Как видно из табл. 2, нелинейное звено с характеристикой $f_a(x)$ дает весьма небольшой прирост среднего времени до срыва слежения, поэтому в дальнейшем его рассматривать не будем.

Из приведенных результатов видно, что при наличии расстройки по частоте добавление в кольцо ФАП нелинейных звеньев с характеристиками $f_b(x)$ и $f_c(x)$ приводит к нежелательным последствиям. В этом случае наилучший результат показывает нелинейное звено с характеристикой $f_d(x)$.

Следует обратить внимание на явление, возникающее для нелинейных звеньев с характеристиками $f_b(x)$ и $f_c(x)$ при малом значении η . На участках, где значения функций $f_b(x)$ и $f_c(x)$ равны нулю, фазовые траектории становятся вертикальными. Это является большим преимуществом по сравнению с нелинейными звеньями с характеристиками $f_a(x)$ и $f_d(x)$. Например, если под действием шума точка на фазовой плоскости переместилась вверх от фокуса, т.е. переменная y увеличилась, то при движении обратно к фокусу производная $\frac{dx}{dt}$ будет иметь по-

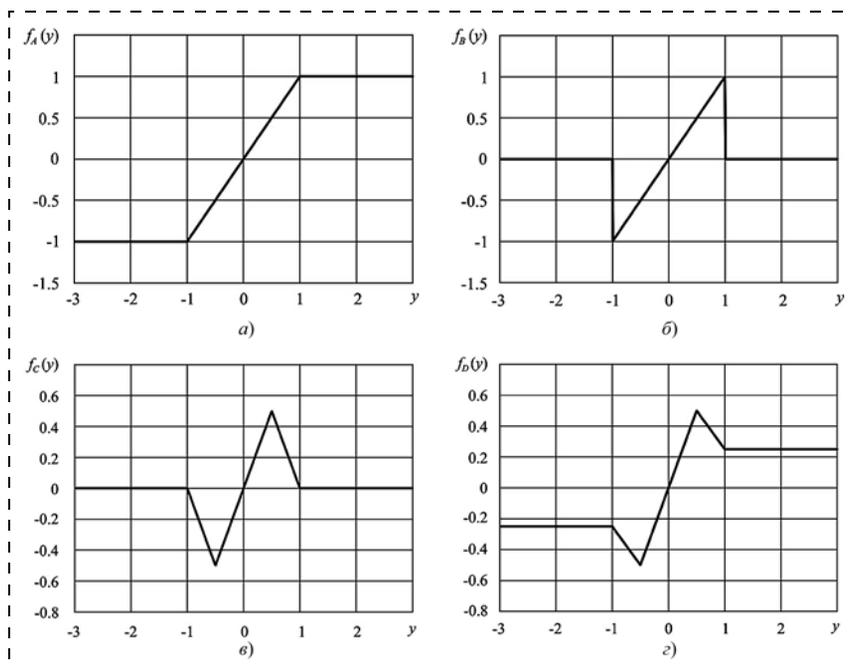


Рис. 14. Характеристики нелинейных звеньев в петле обратной связи ФАП

Таблица 1
Зависимость среднего времени до срыва слежения от типа нелинейного звена

Тип нелинейности	Параметр нелинейности					
	$\eta = 1,5$	$\eta = 2$	$\eta = 2,5$	$\eta = 3$	$\eta = 4$	$\eta \rightarrow \infty$
$f_a(x)$	310	265	254	253	253	253
$f_b(x)$	701	323	261	255	253	253
$f_c(x)$	12 658	1426	565	368	271	253
$f_d(x)$	4268	970	478	348	267	253

Таблица 2
Зависимость среднего времени до срыва слежения в ФАП с нелинейным звеном в петле обратной связи от β и η

Начальная расстройка по частоте	Параметр нелинейности				
	$\eta = 1,5$	$\eta = 2$	$\eta = 2,5$	$\eta = 3$	$\eta \rightarrow \infty$
	$f_a(x)$				
$\beta = 0,1$	261	229	223	221	221
$\beta = 0,2$	172	161	159	157	157
$\beta = 0,4$	69,9	68,7	68,2	67,8	67,8
	$f_b(x)$				
$\beta = 0,1$	484	267	226	221	221
$\beta = 0,2$	247	177	161	158	157
$\beta = 0,4$	72,3	70,2	68,8	68,2	67,8
	$f_c(x)$				
$\beta = 0,1$	2373	782	414	301	221
$\beta = 0,2$	318	314	226	184	157
$\beta = 0,4$	18,8	69,4	75,8	71,1	67,8
	$f_d(x)$				
$\beta = 0,1$	1529	609	363	281	221
$\beta = 0,2$	438	284	213	183	157
$\beta = 0,4$	68,2	79,1	74,1	72,4	67,8

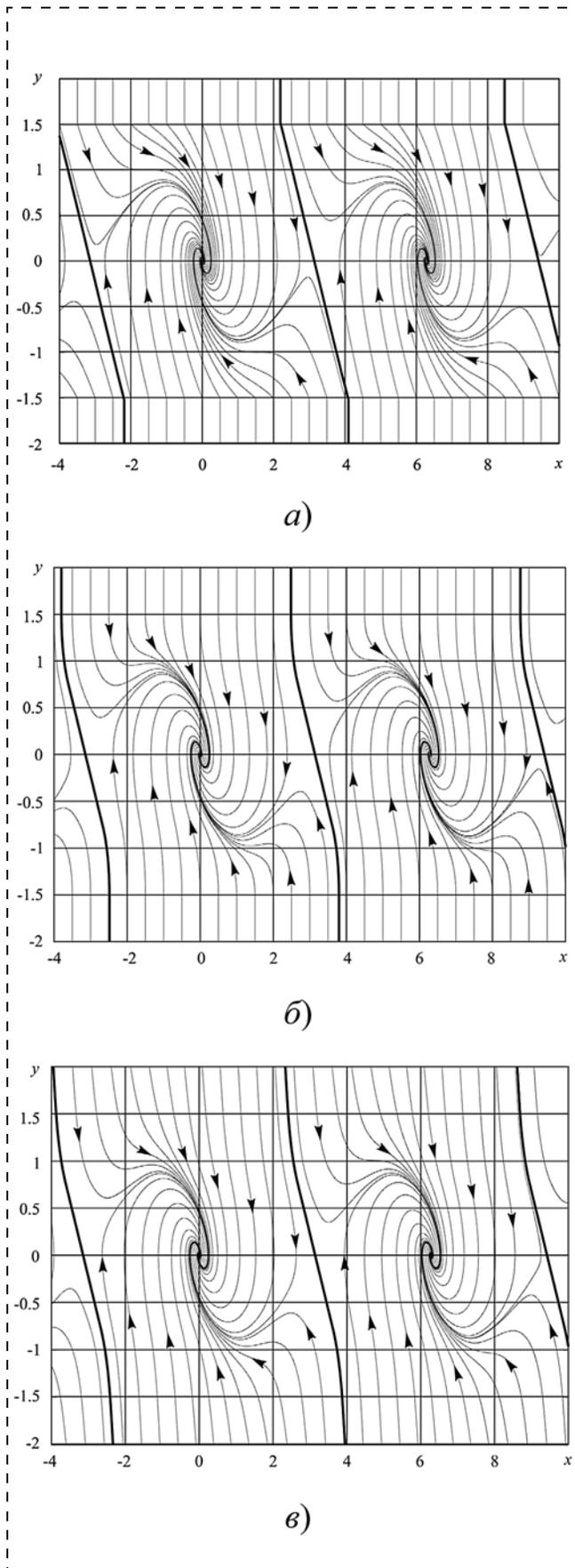


Рис. 15. Фазовые плоскости ФАП для нелинейных звеньев с характеристиками f_b (а), f_c (б), f_d (в) при $\alpha_0^2 = 1$; $\beta = 0$; $\eta = 1,5$

ложительное значение, т.е. точка будет двигаться вправо. Она будет приближаться к сепаратрисе, что может привести к срыву слежения. Для нелинейных звеньев с характеристиками $f_b(x)$ и $f_c(x)$ при увеличении переменной y больше значения η производная $\frac{dx}{dt}$ становится равной нулю, и сноса точки вправо не происходит. Точка движется по фазовой плоскости вертикально вниз и не приближается к сепаратрисе.

Среднее время работы до срыва слежения при использовании нелинейного звена с характеристикой $f_c(x)$ значительно больше, чем для звена с характеристикой $f_b(x)$. Попробуем объяснить этот факт. При условии $\eta < y$ обе нелинейности становятся равными нулю, и точка начинает двигаться вертикально вниз. Переменная y уменьшается и со временем становится меньше η . При этом значения функций $f_b(x)$ и $f_c(x)$ перестают принимать ну-

левые значения, и производная $\frac{dx}{dt}$ тоже становится отличной от нуля. Точка на фазовой плоскости начинает двигаться вправо, причем для нелинейного звена с характеристикой $f_b(x)$ скорость движения резко возрастает. Если же используется нелинейное звено с характеристикой $f_c(x)$, то скорость точки возрастает постепенно, и точка приближается к сепаратрисе не так быстро, как для звена с характеристикой $f_b(x)$, что приводит к значительному увеличению времени работы до срыва слежения.

На рис. 15 приведены изображения фазовых плоскостей ФАП с нелинейностями f_b (а), f_c (б) и f_d (в) при $\alpha_0^2 = 1$; $\beta = 0$; $\eta = 1,5$.

Следует отметить, что равенство нулю значений функций $f_b(x)$ и $f_c(x)$ в некоторых промежутках может приводить к появлению дополнительных положений равновесия.

Система уравнений, описывающая работу ФАП с нелинейным звеном при отсутствии шума и $\beta = 0$, имеет вид

$$dy = -\alpha_0^2 [y + \sin x] dt;$$

$$dx = -f(-y) dt.$$

Из второго уравнения этой системы видно, что при $|y| > \eta$ значение производной $\frac{dx}{dt}$ будет равно нулю. Приравняем нулю производную в первом уравнении системы и найдем побочное положение равновесия

$$\frac{dy}{dt} = -\alpha_0^2 [y + \sin x] = 0;$$

$$|y| > \eta.$$

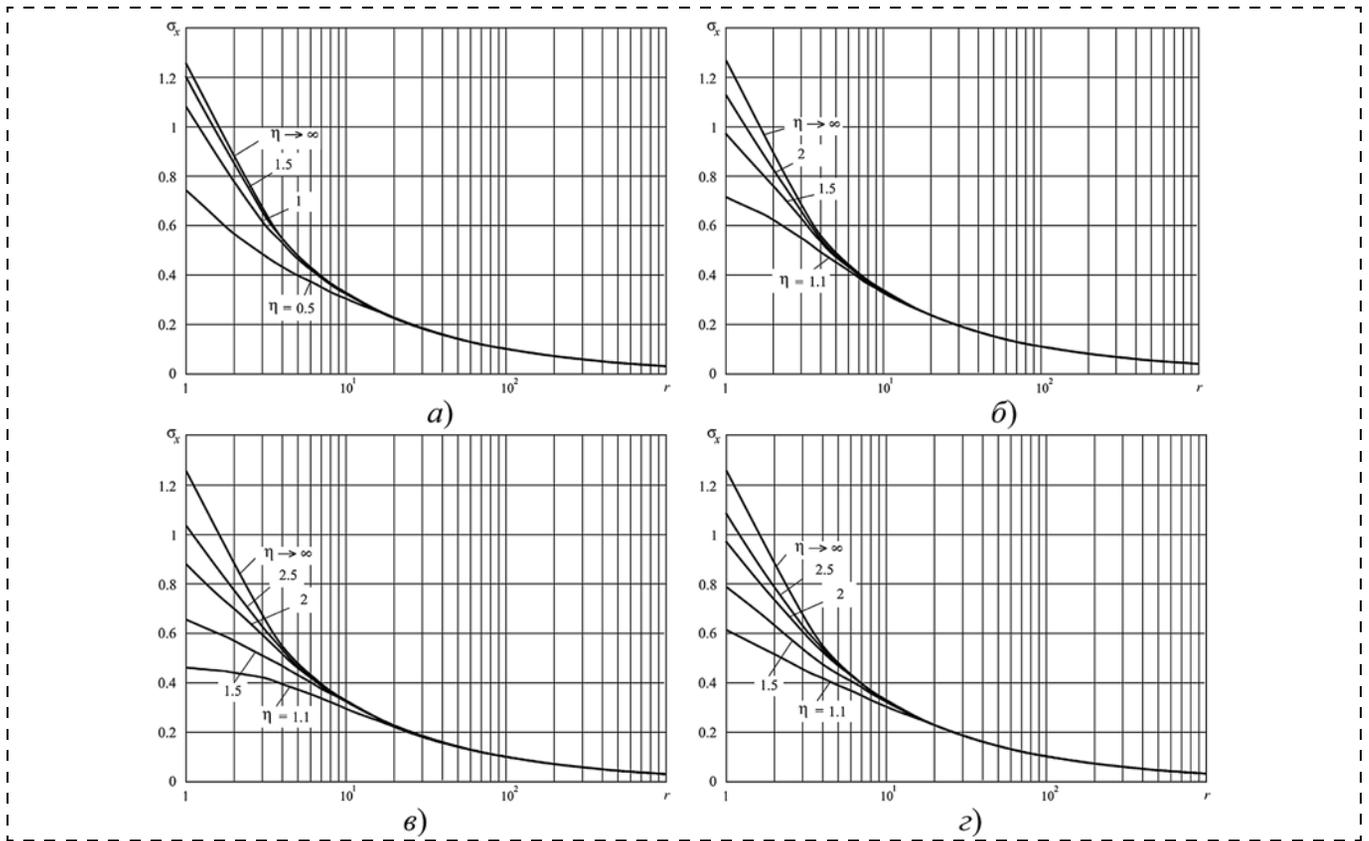


Рис. 16. Зависимость средневладратичного значения фазовой ошибки от отношения сигнал/шум r и вида нелинейного звена f_a (а), f_b (б), f_c (в), f_d (г) при $\alpha_0^2 = 1, 0$; $\beta = 0$

Откуда получаем, что точка побочного положения равновесия удовлетворяет условиям

$$y = -\sin x;$$

$$|\sin x| > \eta.$$

Появление нового положения равновесия можно предотвратить, если выбирать $\eta > 1$, так как значение синуса не может быть больше единицы, и второе неравенство выполняться не будет.

Далее рассмотрим влияние характеристики нелинейного звена на средневладратичское отклонение (СКО) фазовой ошибки. На рис. 16 показана зависимость СКО фазовой ошибки от интенсивности шума r при различных значениях η для всех четырех нелинейных фильтров. Из приведенных графиков видно, что наличие нелинейного звена уменьшает дисперсию фазовой ошибки, что является еще одним положительным эффектом от введения нелинейности в кольцо ФАП.

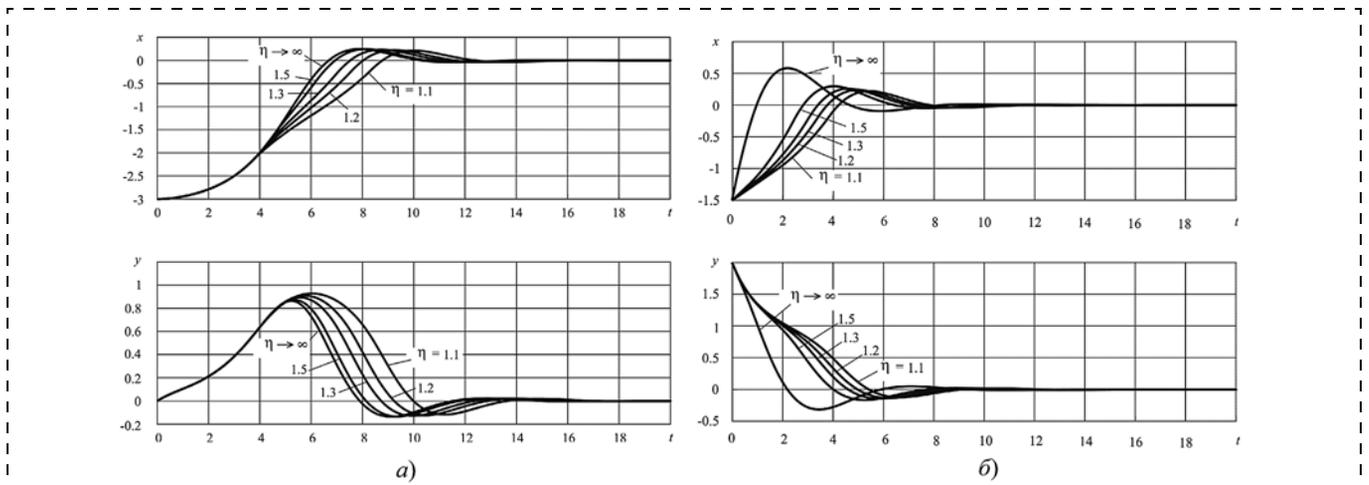


Рис. 17. Переходный процесс для ФАП с нелинейным звеном f_d при $\alpha_0^2 = 1$; $\beta = 0$, различных значениях параметра η и начальных условиях: а — $(-3; 0)$; б — $(-1,5; 2)$

Наконец выясним, как влияет наличие нелинейного звена на динамику работы ФАП. Будем рассматривать траектории движения к положению равновесий из разных начальных точек. Наилучшие результаты в увеличении среднего времени работы до срыва слежения получились при использовании звеньев с характеристиками $f_c(x)$ и $f_d(x)$. На рис. 17 приведены зависимости фазовой ошибки и ошибки по частоте от времени в ФАП с нелинейным звеном с характеристикой $f_d(x)$ при различных значениях η и различных начальных условиях.

Из рисунков видно, что при наличии нелинейного звена переходной процесс несколько затягивается. Это связано с тем, что ограничение значе-

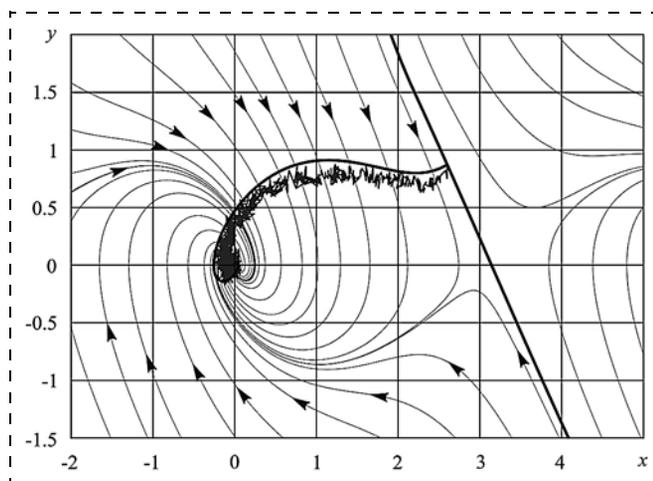


Рис. 18. Усредненная и наиболее вероятная траектории срыва слежения в ФАП с ИФ и нелинейным звеном $f_d(x)$ на фазовой плоскости при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$; $\eta = 1$; $\beta = 0$

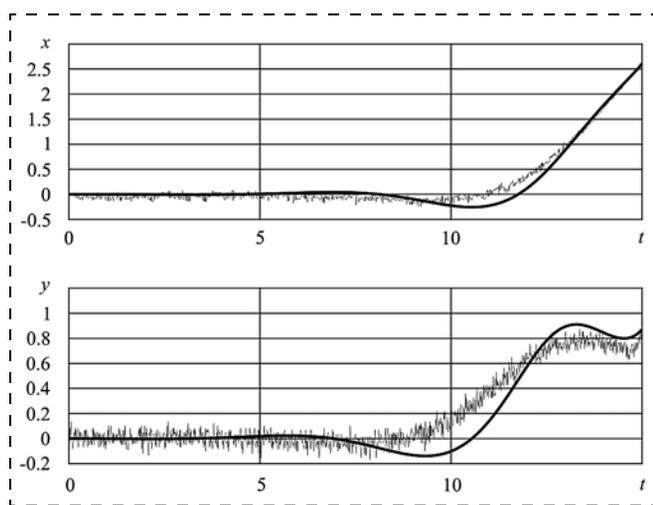


Рис. 19. Зависимости от времени усредненных и наиболее вероятных координат в пространстве состояний ФАП с ИФ и нелинейным звеном $f_d(x)$ при срыве слежения при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$; $\eta = 1$; $\beta = 0$

ния координаты y приводит к более медленному движению вдоль соответствующей координаты.

Наконец, на рис. 18 и 19 приведены наиболее вероятные траектории срыва слежения, полученные в результате имитационного моделирования и вычисленные путем решения системы ДУ (31) для ФАП с ИФ и нелинейностью в петле обратной связи с характеристикой $f_d(x)$ при $\alpha_0^2 = 1$; $r = 2$; $\eta = 1$; $\beta = 0$. Результаты расчетов подтверждают достаточное для практики совпадение решения (31) с данными моделирования.

Заключение

Таким образом, для ФАП второго порядка получены обыкновенные дифференциальные уравнения, с достаточной для практики точностью описывающие возможные наиболее вероятные траектории до срыва слежения (достижения сепаратрисы). На основе этих дифференциальных уравнений представлена новая математическая модель аномального шума. Данные результаты в дальнейшем можно использовать для расчета рабочей характеристики ФАП при низких отношениях сигнал/шум. Также показан механизм увеличения среднего времени до срыва слежения в ФАП с нелинейным звеном в петле обратной связи и предложена рациональная форма данной нелинейности.

Список литературы

1. Tausworthe R. C. Simplified formula for mean cycle slip time of phase-locked loop with steady-state phase error // IEEE Trans. 1972. Vol. COM-20, No. 3. P. 331–337.
2. Шахтарин Б. И. Статистическая динамика систем синхронизации. М.: Радио и связь, 1998.
3. Шахтарин Б. И., Щепкин Ю. Н. Экспериментальное исследование флуктуационных помех на систему фазовой автоподстройки частоты // Электросвязь. 1966. № 9. С. 18–23.
4. Миронов М. А., Белоусова В. С. Срыв синхронизации в системах фазовой автоподстройки второго порядка // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 26, № 1. С. 118–126.
5. Миронов М. А., Белоусова В. С. Статистические характеристики срыва синхронизации в аналоговых системах фазовой автоподстройки второго порядка // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 26, № 4. С. 783–792.
6. Шахтарин Б. И., Сизых В. В., Трешневская В. О. Статистические характеристики фазовой автоподстройки с интегрирующим фильтром // Радиотехника и электроника. 1997. № 7. С. 839–844.
7. Сизых В. В., Шахтарин Б. И. Исследование статистических характеристик фазовой автоподстройки частоты второго порядка // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 42, № 5.
8. Сизых В. В., Щукин П. Н. Вопросы анализа срыва слежения в непрерывных системах фазовой автоподстройки // Радиотехника. 2011. № 12. С. 87–103.
9. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении. М.: Советское радио, 1978.
10. Шахтарин Б. И. Анализ систем синхронизации при наличии помех. М.: ИПРЖР, 1996.
11. Rise S. O. Noise in FM receivers // Proc. Symp. Time Series Analysis / Ed. M. Rosenblatt. N. Y.: Wiley, 1963.
12. Hess D. T. Cycle slipping in first-order phase-locked loop // IEEE Trans. 1968. Vol. COM-16, N. 2. P. 255–260.

Mechanism of the Cycle Slips in the Stochastic Analog Phase-Locked Loops of the First and Second Orders

V. V. Sizykh², vsizykh@yandex.ru, B. I. Shakhtarin¹, shakhtarin@mail.ru✉,
V. A. Shevtsev², vshevtsev@inbox.ru,

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,

² Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: **Shakhtarin Boris I.**,
Bauman Moscow State University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: shakhtarin@mail.ru

Received on July 04, 2016

Accepted on July 24, 2016

A posteriori broadband input noise characteristics of the analog phase locked loop (PLL) system along the cycle slip trajectory were studied on the basis of Markov stochastic model. It was demonstrated that the cycle slips were caused by an unlikely event — existence of an extended period of time, in which a random process, which describes the noise, mainly preserves its sign. A mathematical model of the most probable cycle slip trajectory in the stochastic analog of PLL of the first and second orders in the form of the ordinary differential equations with respect to the coordinate system on the phase plane was presented. There was demonstrated equivalence of the approaches to search the most probable cycle slip trajectory: the search for the maximum of the probability density function of the points of coordinates along the trajectory and the solution of the variational problem. A model of abnormal noise associated with the cycle slips effect was presented. An approximated formula for description of the spectral power density of the abnormal noise was offered. The process of the cycle slips in the PLL with the non-linear element in the feedback loop was investigated. It was demonstrated that such systems have improved characteristics of the average time before a cycle sleep in comparison with the traditional ones. An explanation for an increase of time before a tracking failure, when using a non-linear element in the feedback loop, was presented. Approaches to selection of the type of nonlinearity were considered. Numerical values for the average time before a cycle sleep for various types of non-linearity and parameters of PLL on the basis of computer simulation were presented.

Keywords: phase-locked loop, cycle slip, abnormal noise, phase error, nonlinear element

Acknowledgements: The work was done as a part of the project on the instructions № 1776 № 8.1776.2014/K to perform research in the framework of the project of the state task in the field of scientific activities of the Russian Ministry (supervisor Shakhtarin B. I.).

For citation:

Sizykh V. V., Shakhtarin B. I., Shevtsev V. A. Mechanism of the Cycle Slips in the Stochastic Analog Phase-Locked Loops of the First and Second Orders, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 7—21.

DOI: 10.17587/mau.18.7-21

References

1. Tausworthe R. C. Simplified formula for mean cycle slip time of phase-locked loop with steady-state phase error, *IEEE Trans.*, 1972, vol. COM-20, no. 3, pp. 331—337.
2. Shakhtarin B. I. *Statisticheskay dinamika sistem sinhronizatsii* (Statistical dynamics of synchronization systems), Moscow, Radio i svayz, 1998 (in Russian).
3. Shakhtarin B. I., Shepkin U. N. *Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniy fluktuatsionnykh pomekh na sistemy fazovoi avtopodstroyki chastoty* (Experimental research of the effect of fluctuation noise in the phase locked loop), *Electrosvyaz*, 1966, no. 9, pp. 18—23 (in Russian).
4. Mironov M. A., Belousova V. S. *Sriva sinhronizatsii v sistemah fazovoi avtopodstroyki vtorogo poraydka* (Failure to synchronize a phase locked second-order systems), *Radiotekhnika i Elektronika*, 1981, vol. 26, no. 1, pp. 118—126 (in Russian).

5. Mironov M. A., Belousova V. S. *Statisticheskie harakteristiki sriva sinhronizatsii v analogovykh sistemah fazovoi avtopodstroyki vtorogo poraydka* (The statistical characteristics of the synchronization failure in the analog phase-locked second order), *Radiotekhnika i Elektronika*, 1981, vol. 26, no. 4, pp. 783—792 (in Russian).

6. Shakhtarin B. I., Sizykh V. V., Treshnevskaya V. O. *Statisticheskie kharakteristiki fazovoi avtopodstroyki s integriruyushim filtrom* (Statistical characteristics of a phase locked loop with integrating filter), *Radiotekhnika i Elektronika*, 1997, no. 7, pp. 839—844 (in Russian).

7. Sizykh V. V., Shakhtarin B. I. *Issledovanie statisticheskikh kharakteristik fazovoi avtopodstroyki chastoty vtorogo poraydka* (Investigation of statistical characteristics of the second order phase locked loop), *Radiotekhnika i Elektronika*, 1998, vol. 42, no. 5 (in Russian).

8. Sizykh V. V., Schukin P. N. *Voprosi analiza sriva slezheniy v neprerivnykh sistemah fazovoi avtopodstroyki* (Questions of the analysis of cycle slip time in continuous phase locked loops), *Radiotekhnika*, 2011, no. 12, pp. 87—103 (in Russian).

9. Lindsey V. *Sistemy sinhronizatsii v svyazi i upravlenii* (Synchronization systems in communication and), Moscow, Sov. radio, 1978 (in Russian).

10. Shakhtarin B. I. *Analiz sistem sinhronizatsii pri nalichii pomekh* (Analysis of synchronization systems in the presence of interference), Moscow, IPRZHR, 1996 (in Russian).

11. Rise S. O. Noise in FM receivers, *Proc. Symp. Time Series Analysis*, Ed. M. Rosenblatt, N. Y., Wiley, 1963.

12. Hess D. T. Cycle slipping in first-order phase-locked loop, *IEEE Trans.*, 1968, vol. COM-16, no. 2, pp. 255—260.

Н. Е. Шляхов, программист, shlyakhovnikita@gmail.com,

И. В. Ватаманюк, аспирант, vatamaniuk@iias.spb.su,

А. Л. Ронжин, д-р техн. наук, проф., зам. директора, ronzhin@iias.spb.su,

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург

Обзор методов и алгоритмов агрегации роя роботов¹

Обсуждаются проблемы агрегации роя автономных роботов с применением трех методов, основанных на аналогии поведения биологических объектов. Приведены алгоритмы с обоснованием требований к аппаратной реализации сенсорных, вычислительных, сетевых ресурсов и движительных устройств. Представлены методики оценивания эффективности агрегации роя на основе пространственно-временных характеристик. Описана разработанная модель реконфигурации роя роботов в заданную трехмерную форму.

Ключевые слова: роевая робототехника, рой роботов, агрегация, агрегата, децентрализованное управление, многоагентные технологии, реконфигурация, встроенные бортовые вычислители, многомодальные сенсоры

Введение

Понятие роевой робототехники сформировалось на основе таких научных парадигм, как многоагентные технологии и групповая робототехника, где впервые были сформулированы принципы децентрализованного функционирования автономных групп роботов, основанных на попарном взаимодействии. При этом спецификой групповой робототехники является применение гетерогенных унифицированных мобильных роботизированных комплексов, решающих различные задачи и отличающихся бортовыми ресурсами и движительными устройствами. В области роевой робототехники многоагентные технологии применяются для моделирования взаимодействия больших групп простейших гомогенных роботов. Ограниченные ресурсы отдельных роботов существенно влияют на конфигурацию и возможности системы, однако за счет распределенного роевого интеллекта, основанного на данных, извлекаемых в ходе массовых парных взаимодействий роботов, обеспечивается существование роя и решение им требуемых задач.

Рассмотрим ряд задач, для которых характерно применение различного числа роботов. Системы, составленные из большого числа автономных агентов (роботов), могут быть использованы для выполнения коллективных задач, когда задачи либо не могут быть выполнены отдельно взятым роботом, либо гораздо более эффективно могут быть выполнены роботами в группе. В работе [1] опре-

делены следующие категории заданий, которые могут быть выполнены роботами:

- задания, являющиеся исключительно одноагентными, т.е. выполняемыми только одним агентом;
- задания, которые могут быть выполнены эффективнее большим числом агентов;
- задания, традиционно выполняемые большим числом агентов;
- задания, выполнение которых требует работы большого числа агентов.

На рис. 1 показаны примеры задач, решаемых с применением одиночных роботов и роевого подхода взаимодействия роботов.

Роевая робототехника фокусируется на последних трех категориях, и большинство научных исследований показало [2, 3], что применение большого числа задействованных автоматических единиц техники для выполнения задачи позволяет работать с упрощенными по функционалу роботами, в отличие от случая решения задачи одиночным роботом. В последние годы принципы роевого ин-

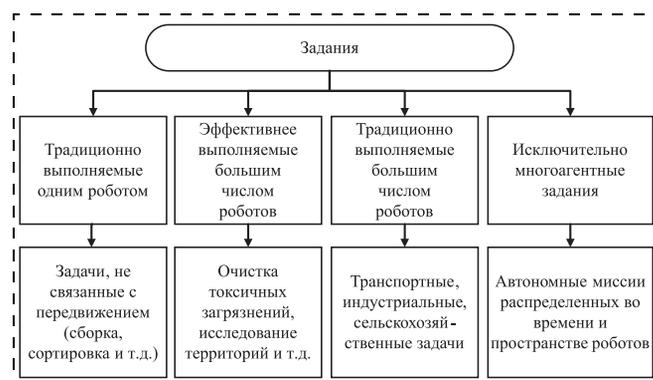


Рис. 1. Классификация заданий, выполняемых роботами

¹ Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 16-29-04101-офи_м) и проекта программы Президиума РАН I.31П "Актуальные проблемы робототехники".

теллекта широко изучаются и внедряются при решении различных задач, в которых группа автономных роботов выполняет задание, используя так называемый распределенный подход, т. е. подход без централизованной координации группы [2–4].

1. Методы агрегации роя роботов

Рассмотрим задачу децентрализованного взаимодействия роботов при их агрегации. Самостоятельная агрегация, т. е. группирование определенного числа автономных объектов в одном месте, — это часто встречающаяся в живой природе модель поведения [5, 6]. Пример агрегации автономных роботов представлен на рис. 2. Для описания агрегации используются разные математические модели.

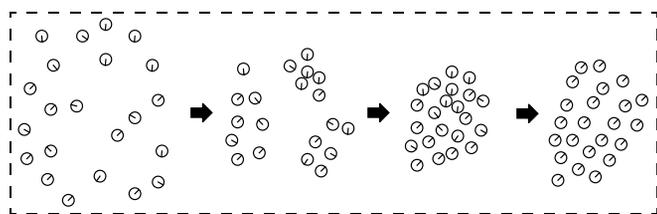


Рис. 2. Пример агрегации автономных агентов

Как правило, задача агрегации изучается либо как самостоятельная проблема, либо как часть более специализированных задач, подразумевающих группирование множества агентов. Здесь и далее самоорганизующиеся группы роботов будем называть агрегатами в соответствии с общепринятой терминологией [7, 8]. Проведенный анализ подходов к агрегации роя роботов показал, что наиболее эффективными являются: метод виртуальных сил, вероятностные методы и эволюционные методы. Рассмотрим их более подробно.

1.1. Метод виртуальных сил

Поведение автономных роботов с помощью метода виртуальных сил моделируется на основе расчета сил, определяющих движение роботов относительно друг друга с учетом расположения объектов окружающего пространства. Многие организованные группы животных (например, рои насекомых, стаи птиц, косяки рыб) можно смоделировать с помощью сил притяжения (из-за которых соседние животные стремятся остаться рядом друг с другом) и сил отталкивания (которые предотвращают возникновение коллизий между животными) [7]. Каждый автономный робот движется согласно силе, действующей на него со стороны соседних роботов и зависящей от расстояния между ними. Обычно силы отталкивания действуют на малых дистанциях, а силы притяжения — на дистанциях, больших некоторого заданного значения.

Хотя метод виртуальных сил успешно применяется для формального описания агрегации роя автономных роботов [8–10], его реализация в искус-

ственных системах с реальными роботами приводит к ряду жестких требований к сенсорной системе каждого робота, выполнение которых может быть сложной и дорогостоящей задачей. Наиболее простые роботы с автономной сенсорной системой характеризуются малым диапазоном видимости, что существенно уменьшает их способность различать других роботов в окружающей среде; определение относительного положения агентов в окружающей среде может сопровождаться множеством ошибок, особенно при использовании инфракрасных датчиков; механические ограничения создают так называемый эффект насыщения в актуаторах робота, ограничивающий амплитуду входных сигналов для регулирования движения робота [9]. Несмотря на перечисленные ограничения применяемых сенсорных систем метод виртуальных сил довольно широко используется для контроля передвижений роботов в наиболее простых системах [6].

1.2. Вероятностные методы

При использовании вероятностного подхода поведение каждого робота имеет случайную составляющую и корректируется в процессе взаимодействия робота с окружающей средой. Такой тип поведения часто встречается в природе у социальных насекомых, таких как пчелы или тараканы. На основе наблюдений за поведением социальных насекомых были созданы вероятностные алгоритмы управления перемещениями роботов на основе конечного автомата с двумя основными состояниями: "идти" и "ждать" [7]. Они соответствуют поведенческим алгоритмам робота. В некоторых случаях состояние "идти" разделяют на два состояния: одно, при котором один робот пытается приблизиться к другим роботам, и другое, при котором робот, наоборот, пытается удалиться от соседей [8]. Решение о смене состояния может быть принято абсолютно случайным образом или на основе локальных сигналов, таких как наличие роботов рядом, или же может основываться на более сложных алгоритмах и сигнальных механизмах. Параметры конечного автомата, такие как вероятность переключения между состояниями, обычно выбираются самим разработчиком роя, однако в последнее время представлены альтернативные методы, основанные на автоматических способах определения параметров [11].

Общая характеристика всех вероятностных алгоритмов агрегации — это наличие нестабильных агрегаций, в которые роботы постоянно входят и которые они постоянно покидают. Агрегационная динамика возникает благодаря изменениям в случайном поведении робота из-за обнаружения соседних роботов. В то время как неагрегированные роботы обычно перемещаются в пространстве случайным образом, динамика агрегированных роботов является детерминистической. Однако компонент случайности в поведении агрегированных роботов

часто является необходимым для формирования небольшого числа крупных агрегатов (групп роботов), во избежание ситуаций, когда наличие маленьких агрегатов не дает роботам присоединиться к более крупным. В исследованиях, где не используются алгоритмы, основанные на конечном автомате, как правило, не существует четкого разграничения между агрегированными и неагрегированными роботами, однако динамика роя может быть определена специальной метрикой, такой как среднее расстояние между роботами, и случайность перемещения робота может быть изменена на непрерывной шкале [12].

1.3. Эволюционные методы

В случае эволюционного метода управления агрегационная динамика достигается с помощью использования контроллеров робота, параметры которых выбираются посредством искусственной эволюции. Примером контроллеров, использующих такой метод, являются нейронные сети. В зависимости от используемого алгоритма сенсорные входы могут включать в себя устройства, способные воспринимать информацию об окружающей среде, а выходы актуаторов могут включать в себя устройства, позволяющие роботам связываться между собой. Примерами алгоритмов, используемых для метода искусственной эволюции, являются генетический алгоритм или турнирный отбор [13–14]. Для искусственной эволюции применяется стандартная парадигма естественной эволюции популяции в дикой природе. Эта парадигма основывается на понятии приспособляемости, которое определяет способность выбранной популяции индивидуумов адаптироваться для выполнения поставленной задачи.

В отличие от эволюционного метода, основанного на понятии приспособленности, метод поиска новизны подразумевает преимущественное положение тех роботов, чье поведение отличается от моделей поведения, которые наблюдались в предыдущих поколениях. Такой метод позволяет предотвратить возможные негативные последствия подхода, основанного на понятии приспособленности, при котором локальный максимум функции приспособленности в параметрическом пространстве может исключить возможность исследования всех остальных частей этого пространства и, тем самым, ограничить эволюционный процесс. В работе [15] алгоритм поиска новизны применяется для решения задачи агрегации, и характеристика поведения выбранной популяции основывается на измерительной метрике, такой как среднее расстояние от каждого робота до центра масс всех роботов или общего числа агрегатов. Эти параметры измеряются несколько раз в ходе симуляции, и их значения (усредненные значения разных проведенных симуляций) добавляются в вектор характеристики поведения, используемый для определения схожести различных моделей поведения. Экспери-

ментальные результаты симуляции с использованием алгоритма поиска новизны и алгоритма приспособления показали, что хотя второй алгоритм в целом лучше при нахождении оптимальных параметров для выполнения задачи агрегации в течение многих "поколений", алгоритм поиска новизны лучше проявил себя на ранней стадии эволюции и лишь слегка ухудшил свои показатели в последующих популяциях, что, в целом, дало значения эксплуатационных характеристик, близких к эволюционному методу, основанному на приспособлении.

Методы, основанные на поиске новизны, опираются на определение сходства между моделями поведения роботов, с помощью которого может быть выявлена новизна поведения каждого конкретного робота. В работе [16] представлены два способа определения схожести, не зависящие от определенного уровня сложности роевой задачи, которые поэтому могут использоваться и без четко определенной задачи. Оба способа основываются на оценке состояния нейроконтроллера, установленного на каждом роботе. Это состояние определяется как вектор, состоящий из входных и выходных сигналов контроллера за определенный промежуток времени. Первый способ, называемый *комбинированным счетчиком состояния*, характеризует модель поведения, дискретизируя возможные состояния контроллера, и подсчитывает появления каждого состояния (за определенный промежуток времени) в течение проводимого эксперимента. Второй способ называется *измерением среднего состояния* и основан на вычислении вектора, характеризующего усредненное состояние роя роботов (т. е. состояние, полученное за счет усреднения состояний всех роботов), измеренного за определенные интервалы времени. Оба способа при применении для решения задачи агрегации показали результаты, сравнимые с результатами при использовании способа определения предметно-ориентированного сходства роботов.

2. Примеры алгоритмов агрегации роботов

В алгоритмах свободной агрегации роботам дается задание собраться вместе, но не устанавливаются никакие предпочтения относительно места сбора. Соответственно, роботы могут собраться вместе с одинаковой вероятностью на любом участке области, где они передвигаются.

Широко изучаемый вероятностный алгоритм агрегации во многом основан на наблюдениях за поведением тараканов. В упрощенной модели агрегации тараканов эти насекомые перемещаются в пространстве случайным образом и останавливаются в некотором месте в зависимости от числа обнаруженных соседей. Вероятность остановки является функцией, зависящей от числа роботов, обнаруженных в определенном радиусе от робота. Большее число роботов соответствует большей вероятности остановки. И наоборот, остановившийся робот может продолжить случайно перемещаться

в пространстве в любое время, возможно, даже покидая агрегационную группу, и вероятность перехода в состояние перемещения тем больше, чем меньше число соседних роботов. Соответственно, переключение из состояния ожидания происходит в двух случаях:

- если робот больше не видит других роботов вокруг себя;
- либо, если у робота есть соседи, он может переключиться в состояние свободного перемещения с некоторой априорно заданной вероятностью.

При такой простой модели поведения свободное перемещение тараканов в некоторой области и их столкновения друг с другом приводят к естественному формированию агрегаций, что демонстрируется различными симуляционными экспериментами [17].

В тех случаях, когда для управления роботами используется конечный автомат с тремя состояниями [18] (а именно, свободное перемещение, приближение и ожидание), состояние перемещения длится в течение фиксированного промежутка времени, после которого робот анализирует окружающую среду: если он находит других роботов, то происходит переход в состояние приближения, и робот начинает движение к ближайшему найденному роботу, а затем переходит в режим ожидания. Если же в процессе анализа робот не обнаружит других роботов, то он просто перейдет в режим ожидания. Из режима ожидания робот может снова переключиться в состояние свободного перемещения с заранее заданной вероятностью. При использовании данного алгоритма вся агрегационная динамика определяется вероятностью, с которой роботы могут обнаружить других роботов в процессе перемещения, учитывая при этом, что большие агрегационные скопления обнаружить проще, чем отдельных роботов.

Существует другой алгоритм, основанный на принципе конечного автомата [19], при использовании которого агрегационное поведение достигается за счет использования следующих четырех состояний: поиск, ожидание, покинуть группу и сменить направление. Робот ищет других роботов и агрегируется с ними, затем происходит переход в состояние ожидания, причем так, что робот стремится сохранить фиксированную дистанцию до каждого из своих соседей. Это позволяет формировать агрегационные группы практически круглой формы. Как и в стандартной версии вероятностного алгоритма, описанной ранее, во избежание ситуаций, когда маленькие агрегации препятствуют формированию больших агрегаций, роботы могут покидать свою группу в любой момент времени с заранее заданной вероятностью.

Существует подход [20], при котором агрегация достигается в симулированной робототехнической системе, где каждый робот снабжен всенаправленным динамиком и набором микрофонов. Роботы используют звуковые волны для определения своего

взаимного расположения. Основные состояния конечного автомата, реализованные в данном случае, — это сближение, ожидание и отталкивание. В состоянии сближения робот движется по направлению к источнику самого громкого звука, в то время как в состоянии отталкивания роботы движутся в противоположных направлениях. Когда робот в состоянии сближения обнаруживает другого робота на близком расстоянии, он переходит в состояние ожидания, в котором он остается на своей текущей позиции. Робот переходит в состояние отталкивания с заранее заданной вероятностью, а затем возвращается в состояние сближения с другой заранее заданной вероятностью.

Любопытной является система Триани [21], в которой роботы снабжены источником светового излучения, который может быть использован для оповещения других роботов. С помощью сенсорного восприятия (роботы могут определять присутствие других роботов поблизости, а также измерять интенсивность излучаемого другим роботом света) каждый робот создает собственное ситуационное представление об окружающей обстановке. В каждый момент времени робот случайным образом выбирает модель поведения из заранее заданных шаблонов (включая перемещения к другим роботам и от них, а также включение и выключение светового излучателя). Вероятности выбора разных моделей поведения определяются на основе сформированного роботом представления об окружающей обстановке. Такой генетический алгоритм может быть адаптирован под разные коллективные задачи, если определить, как конкретно получаемая сенсором информация будет трактоваться роботом, и определить вероятности активации основных моделей поведения на основе различной окружающей обстановки. Такой подход позволяет выполнить задачу агрегации.

В работе [22] вероятность того, что робот покинет свою группу, определяется его ориентацией по отношению к другим роботам в группе. Робот, обращенный к центру агрегаты, имеет более низкую вероятность выхода из нее, чем робот, ориентированный в других направлениях. По примеру различных природных явлений, таких как сборка молекул, стабильность агрегации описывается с помощью энергии связей между роботами, которая является функцией относительного расположения роботов. Для простоты авторы работы свели исследование к агрегате, состоящей из двух роботов, где энергия агрегаты равна энергии связи между двумя роботами.

В работе [23] применяются минималистические агрегационные алгоритмы, при которых сигнал, получаемый на входе сенсоров, ограничен одной двоичной переменной, которая определяет, есть ли другой робот в поле зрения. В исследовании [24] рассмотрен алгоритм, согласно которому робот получает команду двигаться назад по кривой траектории, если ни один робот не обнаружен в поле

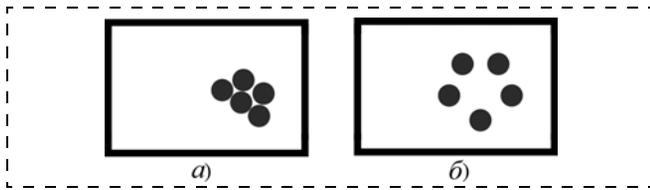


Рис. 3. Сформированная агрегата при разных типах поведения агентов:
a — статическая агрегация; *б* — динамическая агрегация

зрения, а в противном случае — поворачиваться на месте. Этот простой механизм позволяет достичь эмерджентной агрегации, в том случае если сенсоры роботов могут работать на достаточно большом расстоянии. Однако из-за отсутствия поведенческой модели, похожей на свободное перемещение, агрегация не может быть гарантирована, в случае если изначально роботы находились на большем расстоянии друг от друга, чем расстояние чувствительности сенсоров.

В работе [25] роботы, снабженные микрофонами, датчиками сближения, колесами и динамиком, контролируются нейронной сетью, параметры которой определяются генетическим алгоритмом. Были исследованы два типа коллективного поведения: статическая и динамическая агрегация. Агрегаты обоих типов представлены на рис. 3.

Первый тип определяет формирование компактных и статических агрегатов, которые, однако, не имеют возможностей для масштабирования, поскольку большое число роботов в одной области имеют склонность к формированию множественных непересекающихся кластеров. В случае динамической агрегации сформированные агрегаты менее компактны, но они продолжают перемещаться по области, и при нахождении в области большого числа роботов различные агрегаты стремятся слиться и сформировать единую агрегату. Соответственно, динамическая агрегация имеет большую масштабируемость.

3. Методики оценивания эффективности агрегации роботов

Метрика, или показатель эффективности агрегационных задач, обычно основывается либо на определении отдельных групп роботов, формирующих агрегаты, либо на пространственном распределении роботов в определенной области. В первом случае требуется формальное определение агрегатов. Чаще всего под агрегатом понимают группу роботов, такую что для любой пары роботов в группе есть соединяющая их цепочка, состоящая из роботов, находящихся друг от друга на максимально допустимом расстоянии. Максимально допустимое расстояние обычно выбирается на основе параметров робота: дистанции работы модулей связи и чувствительности сенсоров. В исследованиях, где роботы управляются конечным автоматом, понятие агрегатов может быть определено как группа

роботов, контроллеры которых находятся в состоянии "ожидание".

Следовательно, в зависимости от используемого метода управления роботами показатель эффективности агрегации можно рассчитать как отношение числа роботов, образующих самую большую агрегату, к общему числу роботов [18] или как средний размер агрегаты в области [20]. Более тщательный анализ агрегационной динамики может быть проведен путем наблюдения за распределением роботов, находящихся в агрегатах разных размеров. В задачах, где целью является агрегация роботов в определенной области, стандартной метрикой является процент роботов, находящихся в целевой области или на определенном расстоянии от места агрегации [20, 26]. На рис. 4, *a* изображены роботы, часть из которых сформировала агрегату внутри окружности, и эта часть составляет 45 %.

Второй тип метрики предполагает нахождение местоположения всех роботов в области и определение их относительного расположения. В работе [27] в качестве оценки использована сумма расстояний между каждой парой роботов (рис. 4, *б*). В работе [23] используется значение среднего расстояния от роботов до центра масс роя (рис. 4, *в*). В исследовании [24] использовали так называемый "второй момент роботов", вычисляемый как сумма квадратов расстояний от каждого робота до центра масс. В работе [28] использован так называемый "коэффициент ограничительной рамки", определяемый как отношение площади наименьшего квадрата, содержащего в себе всех роботов, к площади всей области (рис. 4, *г*).

Также важной характеристикой агрегации роя роботов является временная оценка. В работе [29] в качестве временной оценки используется скорость,

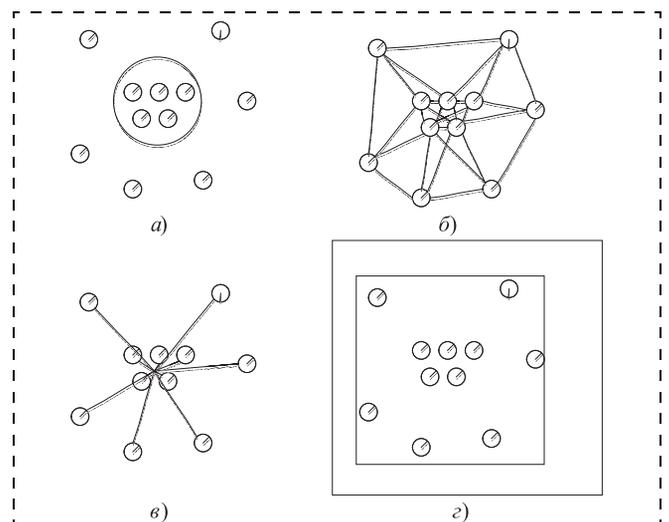


Рис. 4. Графические иллюстрации различных видов метрик агрегации роботов:
a — оценка агрегаты роботов внутри заданной окружности; *б* — сумма расстояний между всеми парами роботов; *в* — среднее расстояние от роботов до центра масс роя; *г* — "коэффициент ограничительной рамки"

с которой рой осуществляет агрегацию. Обычно такая метрика вычисляется как время, прошедшее от стадии, когда роботы расположены в области случайным образом, и до того момента, как роботы сформируют агрегату с заданными параметрами.

4. Программно-алгоритмическая модель целенаправленной реконфигурации роя роботов

В рамках предварительных исследований по роевой робототехнике были разработаны принципы и концептуальная модель процесса реконфигурации пространственного положения группы роботов, которые учитывают ограничения на геометрические размеры множества гомогенных роботов и занимаемой области начального положения роботов, пространственные характеристики, плотность расположения роботов, а также способы задания целевых координат положения роботов в новой пространственной конфигурации [30, 31]. Разработанная математическая модель реконфигурации роя роботов направлена на управление и навигацию автономных гомогенных мобильных роботов, задействованных в формировании заданной выпуклой поверхности. Вычислительная сложность предложенной модели является квадратичной, так как число целевых точек ограничивается общим числом роботов (активных, задействованных в реконфигурации, и пассивных). При этом сложность модели не зависит от времени движения и длины пере-

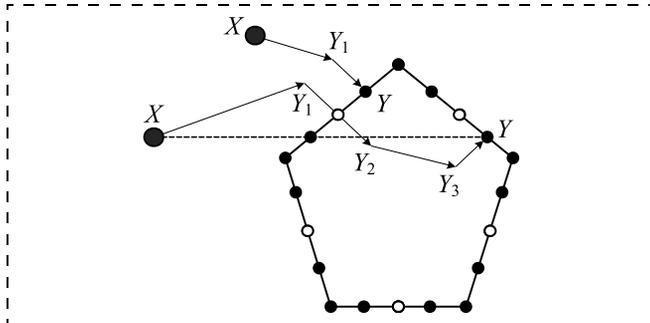


Рис. 5. Пример траекторий роботов, пересекающей и непересекающей формируемую поверхность

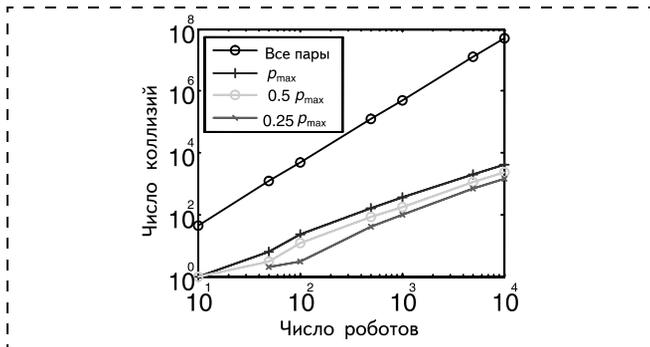


Рис. 6. Оценка числа коллизий с увеличением числа роботов и при разной плотности расположения роботов на поверхности, где ρ_{max} — максимальная допустимая плотность расположения роботов

мещений роботов (рис. 5). В ходе аналитического моделирования реконфигурации роя от 10 до 10 000 роботов при формировании поверхностей выпуклых фигур была проведена оценка числа коллизий (рис. 6), возникающих в случае прямолинейного движения роботов к своим целевым точкам, в предположении, что роботы стартуют одновременно.

По результатам моделирования было выявлено, что:

- число пар роботов с траекториями, приводящими к коллизиям, не превышает 2 % от общего числа пар активных роботов;
- общее число вычислений при разрешении коллизий увеличивается менее, чем логарифм от общего числа пар роботов, и, следовательно, вносит пренебрежимо малый вклад в общую сложность вычислений.

Заключение

В данной статье рассмотрены проблемы агрегации роя роботов, в основном связанные с простейшими вычислительными, сенсорными и двигательными встроенными средствами, а также ограниченными ресурсами роя гомогенных роботов. Обзор основных методов решения задачи агрегации в рое роботов (метод виртуальных сил, вероятностные и эволюционные методы) показал, что выбор применяемого метода, прежде всего, зависит от сенсорных, вычислительных и сетевых ресурсов роботов. Приведены примеры различных алгоритмов агрегации роя роботов, а также ограничения, накладываемые на конструктивные решения техническими требованиями реализации данных алгоритмов.

Для оценивания эффективности агрегации роботов применяются в основном пространственные и временные оценки, конкретный выбор метрики зависит от параметров агрегаты, которую следует сформировать, а также метода агрегации, который технически возможно реализовать для управления заданным роем роботов.

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод о том, что системы, использующие для управления роем нейронные сети, являются наиболее перспективными с точки зрения дальнейшего совершенствования алгоритмов агрегации, тем не менее, для их реализации требуются большие бортовые вычислительные ресурсы.

Разработанное математическое и программное обеспечение управления и навигации роя автономных гомогенных мобильных роботов было проверено при решении задачи формирования заданной пространственной выпуклой поверхности. Дальнейшие исследования будут направлены на решение задач взаимодействия роя роботов при построении более сложных форм с учетом большего числа физических параметров.

Список литературы

1. Dudek G., Jenkin M., Milius E., Wilkes D. A taxonomy for swarm robots // Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '93, IROS'93. 1993. Vol. 1. P. 441–447.
2. Городецкий В. И., Самойлов В. В., Троцкий Д. В. Искусственный интеллект — базовая онтология коллективного поведения автономных агентов и ее расширения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2015. № 5, С. 102–121.
3. Каляев А. И., Каляев И. А. Метод децентрализованного управления группой роботов при выполнении потока заданий // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 1 (6). С. 26–35.
4. Павловский В. Е., Павловский В. В. Масштабируемая система управления роботами робокон-1 // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 4. С. 80–92.
5. Ishikawa T., Locsei J. T., Pedley T. J. Development of coherent structures in concentrated suspensions of swimming model micro-organisms // Journal of Fluid Mechanics. 2008. Vol. 615. P. 401–431.
6. Fetecau R. C. Collective behavior of biological aggregations in two dimensions: anon local kinetic model // Math. Models Methods Appl. Sci. 2011. Vol. 21 (7). P. 1539–1569.
7. Kernbach S., Thenius R., Kernbach O., Schmickl T. Re-embodiment of honeybee aggregation behavior in an artificial micro-robotics system // Adapt. Behav. 2009. Vol. 17 (3). P. 237–259.
8. Bayındır L. A probabilistic geometric model of self-organized aggregation in swarm robotic systems: Ph. D. thesis // Middle East Technical University. 2012.
9. Vanualailai J., Sharma B. A Lagrangian-based swarming behavior in the absence of obstacles // Workshop on Mathematical Control Theory, Kobe University. 2010. P. 8–10.
10. Hackett-Jones E. J., Landman K. A., Fellner K. Aggregation patterns from nonlocal interactions: discrete stochastic and continuum modeling // Phys. Rev. 2012. Vol. 85 (4). P. 041912.
11. Francesca G., Brambilla M., Brutschy A., Trianni V., Birattari M. Auto Mo De: a novel approach to the automatic design of control software for robot swarms // Swarm Intell. 2014. Vol. 8 (2). P. 89–112.
12. Burger M., Haškovec J., Wolfram M. T. Individual based and mean-field modeling of direct aggregation // Physica D: Nonlinear Phenom. 2013. Vol. 260. P. 145–158.
13. Blicke T., Thiele L. A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithm, 2 Edition // TIK-Report. 1995. 67 p.
14. Багитшев Д. И., Исаев С. А. Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетических алгоритмов // Межвузовский сборник научных трудов "Высокие технологии в технике, медицине и образовании". Воронеж: ВГТУ, 1997. С. 4–17.
15. Gomes J., Urbano P., Christensen A. L. Evolution of swarm robotics systems with novelty search // Swarm Intell. 2013. Vol. 7 (2–3). P. 115–144.
16. Gomes J., Christensen A. L. Generic behavior similarity measures for evolutionary swarm robotics // Proceeding of the Fifteenth Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, ACM, New York. 2013. P. 199–206.
17. Correll N., Martinoli A. Modeling Self-Organized Aggregation in a Swarm of Miniature Robots // IEEE 2007 International Conference on Robotics and Automation Workshop on Collective Behaviors inspired by Biological and Biochemical Systems, 2007. P. 1.
18. Schmickl T., Möslinger C., Crailsheim K. Collective perception in a robot swarm // Swarm Robotics, Springer, Berlin. 2007. P. 144–157.
19. Bayındır L. A probabilistic geometric model of self-organized aggregation in swarm robotic systems: Ph. D. thesis // Middle East Technical University. 2012.
20. Soysal O., Şahin E. Probabilistic aggregation strategies in swarm robotic systems // Proceedings 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium, 2005. SIS 2005, IEEE Press, Piscataway. 2005. P. 325–332.
21. Trianni V., Labella T. H., Groß R., Şahin E., Dorigo M., Deneubourg J. L. Modeling Pattern Formation in a Swarm of Self-assembling Robots // Technical Report, IRIDIA, Université Libre de Bruxelles. 2002.
22. Mermoud G., Brugger J., Martinoli A. Towards multi-level modeling of self-assembling intelligent micro-systems // Proceedings of the 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. 2009. Vol. 1. P. 89–96.
23. Gauci M., Chen J., Dodd T. J., Groß R. Evolving aggregation behaviors in multi-robot systems with binary sensors // Distributed Autonomous Robotic Systems. 2014. P. 355–367.
24. Gauci M., Chen J., Li W., Dodd T. J., Groß R. Self-organized aggregation without computation // Int. J. Robot. Res. 2014.
25. Trianni V., Groß R., Labella T. H., Şahin E., Dorigo M. Evolving aggregation behaviors in a swarm of robots // Advances in Artificial Life, Springer, Berlin. 2003. P. 865–874.
26. Garnier S., Jost C., Jeanson R., Gautrais J., Asadpour M., Caprari G., Theraulaz G. Aggregation behavior as a source of collective decision in a group of cockroach-like-robots // Advances in Artificial Life, Springer, Berlin. 2005. P. 169–178.
27. Soysal O., Şahin E. Probabilistic aggregation strategies in swarm robotic systems // Proceedings 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium, 2005. SIS 2005, IEEE Press, Piscataway. 2005. P. 325–332.
28. Fatés N. Solving the decentralized gathering problem with a reaction–diffusion–chemotaxis scheme // Swarm Intell. 2010. Vol. 4 (2). P. 91–115.
29. Arvin F., Turgut A. E., Bellotto N., Yue S. Comparison of different cue-based swarm aggregation strategies // Advances in Swarm Intelligence, Springer, Cham. 2014. P. 1–8.
30. Ватаманюк И. В., Панина Г. Ю., Ронжин А. Л. Реконфигурация пространственного положения роя роботов // Управление большими системами. М.: ИПУ РАН, 2015. Вып. 58. С. 285–305.
31. Ватаманюк И. В., Панина Г. Ю., Ронжин А. Л. Моделирование траекторий перемещения робототехнических комплексов при реконфигурации пространственного положения роя // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 3 (8). С. 52–57.

Review of the Methods and Algorithms of a Robot Swarm Aggregation

N. E. Shlyakhov, shlyakhovnikita@gmail.com, I. V. Vatamaniuk, vatamaniuk@iias.spb.su,

A. L. Ronzhin, ronzhin@iias.spb.su✉

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg

Corresponding author: Ronzhin Andrew L., D. Sc., Professor, Deputy Director,
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation. E-mail: ronzhin@iias.spb.su

Received on August 12, 2016
Accepted on September 01, 2016

The considered problems of aggregation of the swarm robots are mainly connected with the simplest computing, sensors and built-in actuators, as well as limited resources of the homogeneous swarm robots. In the area of the swarm robotics the multi-agent technologies are used to simulate the interaction of big groups of simple homogeneous robots. The limited resources of the individual robots have a significant effect on the configuration and capabilities of the whole system, however, the distributed swarm intelligence based on the data obtained during the mass pair interactions of the robots ensures the existence of a swarm and, due to it, solving of the set tasks. A review of the main methods for solving of the problem of aggregation in a swarm of

robots (the method of the virtual forces, the probabilistic and evolutionary methods) showed that the choice of the used method, first of all, depends on the sensor, computing and network resources of the robots. Examples of different aggregation algorithms for the robot swarms, as well as limitations on the design solutions during implementation of these algorithms are presented. For estimation of the effectiveness of the robot aggregation the spatial and temporal methods are mainly used. The specific choice of the metrics depends on the parameters of the form, which should be achieved, as well as the aggregation method which is technically possible to implement to ensure control of a given robot swarm. By the results of the analysis, a conclusion was made that the systems, which use the neural networks for the swarm control are the most promising in terms of the further improvement of the aggregation algorithms, however, their implementation requires large onboard computational resources. During the preliminary research concerning the swarm robotics the principles and conceptual model were developed for the process of reconfiguration of the spatial position of the group of robots. They take into account the restrictions on the geometrical dimensions of a set of homogeneous robots and the occupied area of the initial position of the robots, the spatial characteristics, density of the robots' locations, as well as the ways of defining of the target position coordinates of the robots in a new spatial configuration. The further research will be aimed to solve the tasks of interaction within the robot swarm during construction of more complex forms, taking into account a bigger number of the physical parameters.

Keywords: swarm robotics, robot swarm, aggregation, aggregate, decentralized control, multi-agent technology, reconfiguration, embedded board computers, multimodal sensors

Acknowledgements: The study was supported by RFBR (grant № 16-29-04101-ofi_m) and the draft program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences I.31P "Actual Problems of Robotics."

For citation:

Shlyakhov N. E., Vatamaniuk I. V., Ronzhin A. L. Review of the Methods and Algorithms of a Robot Swarm Aggregation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 22–29.

DOI: 10.17587/mau.18.22-29

References

1. Dudek G., Jenkin M., Miliot E., Wilkes D. A taxonomy for swarm robots, *Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '93, IROS'93*, 1993, vol. 1, pp. 441–447.
2. Gorodeckij V. I., Samojlov V. V., Trockij D. V. *Iskusstvennyy intellekt bazovaya ontologiya kollektivnogo povedeniya avtonomnykh agentov i ee rasshireniya* (Artificial intelligence is a basic ontology of the collective behavior of autonomous agents and its extension), *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2015, no. 5, pp. 102–121 (in Russian).
3. Kalyaev A. I., Kalyaev I. A. *Metod decentralizovannogo upravleniya gruppoj robotov pri vypolnenii potoka zadaniy* (Decentralized control method is a group of robots in tasks flow), *Robototekhnika i Tehnicheskaja Kibernetika*, 2015, no. 1 (6), pp. 26–35 (in Russian).
4. Pavlovskij V. E., Pavlovskij V. V. *Masshtabiruemaja sistema upravlenija robotami robokon-1* (Scalable Control System robot Robocop-1), *Informacionno-izmeritel'nye i Upravljajushhie Sistemy*, 2013, vol. 11, no. 4, pp. 80–92 (in Russian).
5. Ishikawa T., Locsei J. T., Pedley T. J. Development of coherent structures in concentrated suspensions of swimming model micro-organisms, *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, vol. 615, pp. 401–431.
6. Fetecau R. C. Collective behavior of biological aggregations in two dimensions: an local kinetic model, *Math. Models Methods Appl. Sci.*, 2011, vol. 21 (7), pp. 1539–1569.
7. Kernbach S., Thenius R., Kernbach O., Schmickl T. Re-embodiment of honeybee aggregation behavior in an artificial micro-robotics system, *Adapt. Behav.*, 2009, vol. 17 (3), pp. 237–259.
8. Bayındır L. A probabilistic geometric model of self-organized aggregation in swarm robotic systems: Ph. D. thesis, Middle East Technical University, 2012.
9. Vanualailai J., Sharma B. A Lagrangian-based swarming behavior in the absence of obstacles, *Workshop on Mathematical Control Theory*, Kobe University, 2010, pp. 8–10.
10. Hackett-Jones E. J., Landman K. A., Fellner K. Aggregation patterns from nonlocal interactions: discrete stochastic and continuum modeling, *Phys. Rev.*, 2012, vol. 85 (4), pp. 041912.
11. Francesca G., Brambilla M., Brutschy A., Trianni V., Birattari M. Auto Mo De: a novel approach to the automatic design of control software for robot swarms, *Swarm Intell.*, 2014, vol. 8 (2), pp. 89–112.
12. Burger M., Haškovec J., Wolfram M. T. Individual based and mean-field modeling of direct aggregation, *Physica D: Nonlinear Phenom.*, 2013, vol. 260, pp. 145–158.
13. Blicke T., Thiele L. A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithm, 2 Edition, TIK-Report. 1995, 67 p.
14. Batishhev D. I., Isaev S. A. *Optimizacija mnogojekstremal'nyh funkcij s pomoshhju genetičeskikh algoritmov* (Optimization of multi functions using genetic algorithms), *Mezhvuzovskij Sbornik Nauchnyh*

Trudov "Vysokie tehnologii v tehnike, medicine i obrazovanii", Voronezh, Publishing house of VGTU, 1997, pp. 4–17 (in Russian).

15. Gomes J., Urbano P., Christensen A. L. Evolution of swarm robotics systems with novelty search, *Swarm Intell.*, 2013, vol. 7 (2–3), pp. 115–144.

16. Gomes J., Christensen A. L. Generic behavior similarity measures for evolutionary swarm robotics, *Proceeding of the Fifteenth Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, ACM, New York, 2013, pp. 199–206.

17. Correll N., Martinoli A. Modeling Self-Organized Aggregation in a Swarm of Miniature Robots, *IEEE 2007 International Conference on Robotics and Automation Workshop on Collective Behaviors inspired by Biological and Biochemical Systems*, 2007, pp. 1.

18. Schmickl T., Möslinger C., Crailsheim K. Collective perception in a robot swarm, *Swarm Robotics*, Springer, Berlin, 2007, pp. 144–157.

19. Bayındır L. A probabilistic geometric model of self-organized aggregation in swarm robotic systems: Ph. D. thesis. Middle East Technical University. 2012.

20. Soysal O., Şahin E. Probabilistic aggregation strategies in swarm robotic systems, *Proceedings 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, 2005, SIS 2005, IEEE Press, Piscataway, 2005, pp. 325–332.

21. Trianni V., Labella T. H., Groß R., Şahin E., Dorigo M., De-neubourg J. L. Modeling Pattern Formation in a Swarm of Self-assembling Robots. Technical Report, IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, 2002.

22. Mermoud G., Brügger J., Martinoli A. Towards multi-level modeling of self-assembling intelligent micro-systems, *Proc. of the 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2009, vol. 1, pp. 89–96.

23. Gauci M., Chen J., Dodd T. J., Groß R. Evolving aggregation behaviors in multi-robot systems with binary sensors, *Distributed Autonomous Robotic Systems*, 2014, pp. 355–367.

24. Gauci M., Chen J., Li W., Dodd T. J., Groß R. Self-organized aggregation without computation, *Int. J. Robot. Res.*, 2014.

25. Trianni V., Groß R., Labella T. H., Şahin E., Dorigo M. Evolving aggregation behaviors in a swarm of robots, *Advances in Artificial Life*, Springer, Berlin, 2003, pp. 865–874.

26. Garnier S., Jost C., Jeanson R., Gautrais J., Asadpour M., Caprari G., Theraulaz G. Aggregation behavior as a source of collective decision in a group of cockroach-like-robots, *Advances in Artificial Life*, Springer, Berlin, 2005, pp. 169–178.

27. Soysal O., Şahin E. Probabilistic aggregation strategies in swarm robotic systems, *Proc. 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, 2005, SIS 2005, IEEE Press, Piscataway, 2005, pp. 325–332.

28. Fatés N. Solving the decentralized gathering problem with a reaction–diffusion-chemotaxis scheme, *Swarm Intell.*, 2010, vol. 4 (2), pp. 91–115.

29. Arvin F., Turgut A. E., Bellotto N., Yue S. Comparison of different cue-based swarm aggregation strategies, *Advances in Swarm Intelligence*, Springer, Cham, 2014, pp. 1–8.

30. Vatamanjuk I. V., Panina G. Ju., Ronzhin A. L. *Rekonfiguracija prostranstvennogo polozhenija roja robotov* (Reconfiguration of the spatial position of swarm robots), *Upravlenie bol'shim sistemami*, 2015, vol. 58, pp. 285–305 (in Russian).

31. Vatamanjuk I. V., Panina G. Ju., Ronzhin A. L. *Modelirovanie traektorij peremeshhenija robototekhnicheskikh kompleksov pri rekonfiguracii prostranstvennogo polozhenija roja* (Simulation of the path of the robot systems with reconfiguration of the spatial position of the swarm), *Robototekhnika i tehnicheskaja kibernetika*, 2015, no. 3 (8), pp. 52–57.

С. Л. Зенкевич, д-р физ.-мат. наук, проф., mr.zenkev@mail.ru,
Хуа Чжу, аспирант, zhuhua1302@gmail.com,
 Научно-учебный центр "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Управление движением группы роботов в строю типа "конвой"

Рассмотрено управление движением группы роботов в строю типа "конвой". Решена задача локализации роботов с использованием относительного положения. Особое внимание уделено получению закона управления движением роботов вдоль фрагмента траектории предыдущего робота. Приведены результаты моделирования предложенного метода.

Ключевые слова: группа роботов, конвой, локализация, временная задержка

Введение

Часто возникают ситуации, когда один мобильный робот не в состоянии выполнить задачу, в связи с чем возникает проблема согласованного управления группой роботов. Одной из важных задач такого класса является согласованное движение группы роботов, образующих строй типа "конвой" (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Задачи, связанные с такого типа движением, возникают, например, при смене дислокации группы роботов, при перевозке большого количества грузов, которые каждый робот в отдельности не в состоянии перевезти. В этой ситуации ведущий робот должен быть оснащен богатой сенсорной системой,

позволяющей планировать траекторию в непредсказуемой обстановке, например, сканирующими лазерными дальномерами, системами спутниковой навигации, стереозрением. Ведомые роботы в этом случае должны только следить за положением своего ведущего робота.

Рассмотрению движения группы роботов в строю типа "конвой" в настоящее время уделяется большое внимание. В таблице представлены сравнительные характеристики существующих методов.

В данной работе обсуждается способ осуществления движения группы роботов в строю типа "конвой", в том числе, определение положения роботов и получение закона управления.

Сравнение существующих методов

Метод	Принцип работы или цель управления	Преимущество	Недостаток
1	Решение задачи следования или стабилизации [1]	Простота реализации	Возможность столкновения с препятствиями; низкая точность
2	Аппроксимация траектории кривой Безье [2]	Простота реализации	Зависимость точности следования от точности построения кривой Безье
3	Следование к ближайшей точке [3]	Высокая точность	Возможность возникновения колебаний
4	Максимальная степень совпадения траектории роботов [4–6]	Высокая точность	Высокая вычислительная сложность

Постановка задачи

Пусть мобильные роботы движутся в плоскости OXY строем типа "конвой" (рис. 2). Роботы пронумерованы от R_0 — ведущего робота до R_N — замыкающего конвой. Этот тип движения требует, чтобы каждый i -й робот, $i = 1, \dots, N$, кроме ведущего, двигался по траектории, вдоль которой движется $(i - 1)$ -й робот, с некоторым временным запаздыванием T .

Ведущий робот R_0 либо управляется оператором, либо является полностью автономным. В том случае, когда ведущий робот автономен, он оснащен спутниковой системой навигации или сканирующим лазерным дальномером. Остальные роботы имеют систему одометрии и менее мощные лазерные сканеры. Кроме того, все роботы являются узлами беспроводной локальной сети, следовательно, могут обмениваться информацией друг с другом. Ставится задача управления движением группы роботов в строю типа "конвой".

Задачи локализации роботов

Пусть робот R_i перемещается в плоскости OXY , имея два симметрично расположенных ведущих колеса

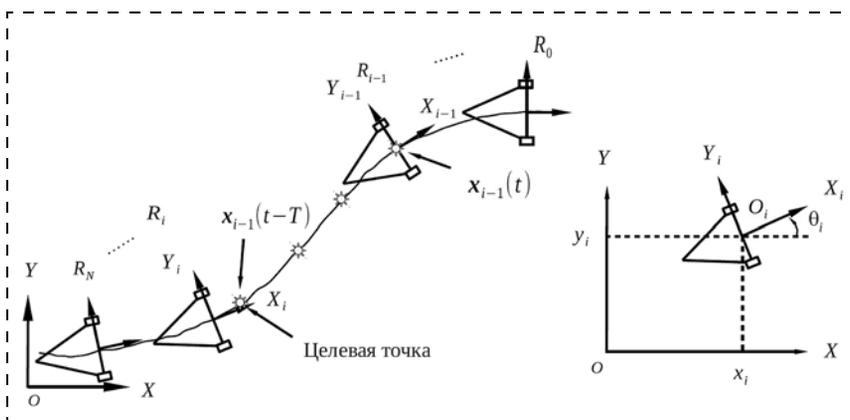


Рис. 2. Постановка задачи

(левое и правое). Свяжем с роботом систему координат, выбрав в качестве начала системы точку, лежащую в центре отрезка, соединяющего центры колес, ось X_i направим перпендикулярно этому отрезку, а ось Y_i направим так, чтобы получилась правая система координат (рис. 2). Пусть выполняются следующие условия: отсутствуют продольное и боковое проскальзывания между колесами и плоскостью. В этом предположении вектор линейной скорости направлен вдоль оси X_i , и кинематические уравнения движения имеют вид [7]

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix} = J(\theta_i) \begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где x_i, y_i, θ_i — положение и ориентация робота; ω_i — угловая скорость робота, а v_i — линейная скорость начала связанной системы координат O_i (далее линейная скорость робота). Если предположить, что управлениями являются угловые скорости левого и правого колеса (ω_l, ω_r), тогда входящие в уравнение (1) параметры ω_i и v_i задаются соотношениями [7]

$$v_i = \frac{R}{2}(\omega_r + \omega_l), \quad \omega_i = \frac{R}{L}(\omega_r - \omega_l), \quad (2)$$

где R — радиус ведущих колес, L — расстояние между центрами двух колес.

Существуют два подхода к решению задачи локализации роботов.

Основная идея первого подхода состоит в том, что каждый робот сам определяет собственное положение независимо (метод SLAM [8]) или каждый робот определяет собственное положение, используя взаимное положение роботов, при которых необходимо знание глобального положения ведущего робота [9].

Основная идея второго способа состоит в том, что мы используем сами роботы в виде подвижных указателей. Для осуществления такого способа требуется выполнение трех условий:

а) знание глобального положения ведущего робота;

б) знание положения ведущего робота относительно ведомого;

в) возможность передавать информацию о положении ведомому роботу (рис. 3).

Используя эту информацию, каждый робот определяет собственное положение в абсолютной системе координат. В процессе решения задачи управления движением каждого робота строится проблема определения собственного положения каждого робота R_{i-1} относительно R_i . В лабораторных условиях эта проблема может быть решена путем установки систем зрения, определяющих декартовы координаты всех членов конвоя, что является невозможным при движении роботов в открытом пространстве.

Рассмотрим решение следующей задачи: по измерениям, проводимым лазерным сканером, требуется

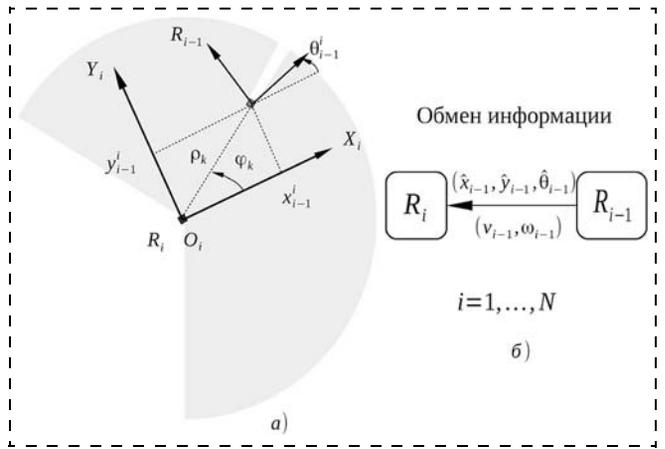


Рис. 3. Локальная окрестность робота R_i (а) и обмен информацией между роботами (б)

определить относительное положение между роботами. Например, $(x_{i-1}^j, y_{i-1}^j, \theta_{i-1}^j)$ является относительным положением робота R_{i-1} в системе координат робота R_i (рис. 3). Для упрощения записи далее $(x_{i-1}^j, y_{i-1}^j, \theta_{i-1}^j)$ будем обозначать (x, y, θ_r) .

Уравнение движения робота R_{i-1} в связанной системе координат $O_i X_i Y_i$ робота R_i имеет вид [7]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \omega_i y - v_i + v_{i-1} \cos\theta_r; \\ \dot{y} &= -\omega_i x + v_{i-1} \sin\theta_r; \\ \dot{\theta}_r &= \omega_{i-1} - \omega_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения (3) описывают поведение параметров движения робота R_{i-1} относительно робота R_i .

Рассмотрим теперь проблему, связанную с неточностью измерений положения ведущего для R_i робота R_{i-1} .

Будем считать, что измерения осуществляются лазерным дальнометром, определяющим в дискретные моменты $t = t_k$ полярные координаты робота $R_{i-1}(\rho_k, \varphi_k)$, содержащие аддитивные нормально распределенные случайные последовательности. Будем также считать, что переход от полярных координат к декартовым приводит к появлению в составе измерений нормально распределенных аддитивных шумов.

Таким образом, уравнение объекта в соответствии с уравнением (3) имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (4)$$

где $\mathbf{x} = (x, y, \theta_r)^T$, $\mathbf{u} = (v_{i-1}, v_i, \omega_{i-1}, \omega_i)^T$.

Уравнение измерений имеет вид

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \xi_k, \quad \xi_k \sim N(0, \mathbf{R}_k), \quad (5)$$

где $\mathbf{z}_k = (x_k, y_k)^T$ — вектор измерений; $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(t_k)$ —

значение вектора \mathbf{x} в момент $t = t_k$; $\mathbf{H}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$.

Тогда, используя известный расширенный фильтр Калмана для нелинейного непрерывного объекта с дискретными измерениями, алгоритм получения

оценки $\hat{\mathbf{x}}$ вектора \mathbf{x} , можно сформулировать следующим образом [11]:

1. Инициализация:

$$\hat{\mathbf{x}}_{(0|0)} = E[\mathbf{x}(t_0)], \mathbf{P}_{(0|0)} = E[(\mathbf{x}(t_0) - \hat{\mathbf{x}})(\mathbf{x}(t_0) - \hat{\mathbf{x}})^T],$$

где E — символ математического ожидания.

2. Процесс прогнозирования ($t_{k-1} < t \leq t_k$):

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t), \mathbf{u}(t));$$

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{F}(t)^T.$$

Начальные условия $\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1}) = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}; \\ \mathbf{P}(t_{k-1}) = \mathbf{P}_{k-1|k-1}. \end{cases}$

Получаем $\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \hat{\mathbf{x}}(t_k); \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{P}(t_k), \end{cases}$

где $\mathbf{F}(t) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}|_{\hat{\mathbf{x}}(t), \mathbf{u}(t)} = \begin{pmatrix} 0 & \omega_i & -v_{i-1} \sin \hat{\theta}_r \\ -\omega_i & 0 & v_{i-1} \cos \theta_r \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$.

3. Процесс обновления ($t = t_k$):

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

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1};$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1}.$$

Задача управления движением роботов

Стратегия управления для каждого ведомого робота, как говорилось выше, состоит в выполнении соотношения

$$x_i(t) = x_{i-1}(t - T), \quad (6)$$

где $x_i(t)$ представляет собой положение робота R_i в текущий момент, $x_{i-1}(t - T)$ — положение робота R_{i-1} в момент времени $t - T$.

Заметим, что эту стратегию (6) предлагал С. Л. Зенкевич в 1973—1976 гг. в работах, связанных с исследованием управления движением самолетов в строю типа конвой [10].

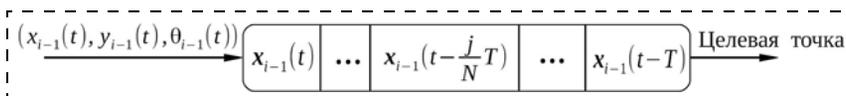


Рис. 4. Процесс нахождения целевых точек для робота R_i

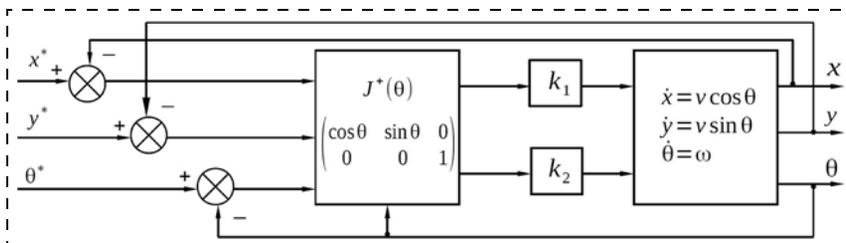


Рис. 5. Структурная схема управления роботом

Для реализации стратегии необходимо:

1. *Запоминание фрагмента траектории ведущего робота.*

В процессе движения каждый ведомый робот R_i имеет в качестве программной траектории сдвинутую во времени траекторию ведущего робота R_{i-1} , динамически меняющуюся во времени. Характер этой траектории, учитывающий дискретность измерений, представлен на рис. 4, где N — число точек, T/N — скважность измерений.

2. *Формирование закона управления движением робота вдоль траектории.*

Закон управления состоит в способе движения робота вдоль динамически меняющейся траектории, заданной набором точек (рис. 4) и представляющей очередь.

Будем считать, что время обновления данных T/N мало по сравнению с инерционными свойствами робота. Это означает, что на вход системы управления поступает непрерывная последовательность в виде программной траектории ($x^*(t)$, $y^*(t)$, $\theta^*(t)$). Тогда из уравнения (1) следует соотношение:

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = J^+(\theta) \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $J^+(\theta)$ — псевдообратная матрица, $J^+(\theta) = (J^T J)^{-1} J^T$, а линейная скорость равна проекции вектора (x, y) на направление движения робота. Принимая

$$\dot{x} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (x^* - x);$$

$$\dot{y} = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (y^* - y);$$

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (\theta^* - \theta),$$

окончательно имеем закон управления в виде

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1(x^* - x) \cos \theta + k_1(y^* - y) \sin \theta \\ k_2(\theta^* - \theta) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где k_1, k_2 — параметры.

На рис. 5 представлена схема, иллюстрирующая формирование управляющих сигналов, обеспечивающих движение робота вдоль произвольной траектории.

Моделирование управления движением группы роботов

• *Результат моделирования способа локализации*

Проведено моделирование приведенного алгоритма оценивания относительного положения между роботами. Робот R_{i-1} совершал движение с угловой скоростью $\omega_{i-1}(t) =$

$= 0,1\sin(0,1(t + 2))$ рад/с и линейной скоростью $v_{i-1}(t) = 0,6$ м/с. Робот R_i совершает движение с угловой скоростью $\omega_i(t) = 0,1\sin(0,1t)$ рад/с и линейной скоростью $v_i(t) = 0,6$ м/с. Измерения моделируемого лазерного сканера Nokuyo-04-LX проводили с частотой 10 Гц.

Результаты моделирования показывают, что в этих условиях оценки координат мало отличаются от моделируемых величин.

На рис. 6 (см. вторую сторону обложки) показана зависимость погрешности локализации ведомых роботов в строю типа "конвой" от номера робота R_i ($i = 1, 2, \dots, 10$).

Из результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Из-за неизбежных неточностей измерений, полученных от лазерного сканера, погрешности накапливаются, что естественно.

2. Как видно из рис. 6, погрешности локализации ведомых роботов с 6 по 10 увеличились с течением времени, а погрешность локализации роботов с 1 по 4 стали почти постоянными с течением времени.

3. С точки зрения локализации с помощью используемого метода наилучшим числом роботов в строю типа "конвой" является число 5, т.е. один ведущий робот и четыре ведомых роботов. Погрешности локализации этих четырех роботов меньше среднеквадратического отклонения измерения ($\sigma = 0,09$ м).

• *Результат моделирования закона управления*

На рис. 7 (см. вторую сторону обложки) показаны результаты моделирования закона управления. Робот R_0 совершал движение с угловой скоростью $\omega_0(t) = 0,1\sin(0,1t)$ рад/с и линейной скоростью $v_0(t) = 1$ м/с.

Для ведомых роботов выбранные параметры регулирования $k_1 = k_2 = 10$ с⁻¹, выбранное время запаздывания $T = 2$ с. Как видно, траектории движения трех роботов почти совпадают.

Заключение

В работе предложен способ управления движением группы роботов в строю типа "конвой", основанный на том, что каждый робот повторяет траекторию предыдущего робота с некоторым временным запаздыванием.

Дальнейшее направление работы авторы видят в проведении экспериментов с участием реальных мобильных роботов, движущихся в строю типа "конвой".

Список литературы

1. Das K., Fierro R., Kumar V., Ostrowski J. P., Spletzer J., Taylor C. J. A vision-based formation control framework // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2002. Vol. 18, N. 5. P. 813–825.
2. Chiem S., Cervera E. Vision-based robot formations with Bezier trajectories // Proc. of the 8th Conference on Intelligent and Autonomous System. 2004. P. 191–198.
3. Yazbeck J., Scheuer A., Charpillat F. Optimized lateral control for a decentralized near-to-near platooning. // INRIA, Tech. Rep. 2013.
4. Thuilot B., Bom J., Marmoiton F., Martinet P. Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic GPS sensor // 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisbon (Portugal). 2004.
5. Yazbeck J., Scheuer A., Charpillat F. Decentralized Near-to-Near Approach for Vehicle Platooning based on Memorization and Heuristic Search. // IEEE International Conference on Robotics & Automation. 2014. P. 631–638.
6. Mark Daniel Ollis. Position estimation and vehicle control in autonomous multi-vehicle convoys. // Patent Application Publication, Pub. № : US 2014/0309836 A1.
7. Зенкевич С. Л., Назарова А. В. Система управления мобильного робота // Вестник МГТУ, серия "Приборостроение". 2006. № 3. С. 31–51.
8. Chen Haoyao. Towards Multi-Robot Formations: Study on Vision Based Localization Systems. URL: <http://hdl.handle.net/2031/5836> (дата обращения: 23.09.2015).
9. Espinosa F., Santos C. Odometry and laser scanner fusion based on a discrete extended Kalman filter for robotic platooning guidance // Sensors. 2011. N. 11. С. 8339–8357.
10. Зенкевич С. Л. и др. Авторское свидетельство. 1977. N 103384.
11. Сейдж Э. Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. Пер. с англ. под ред. проф. Б. П. Левина. М.: Связь, 1976. 496 с.

Control of a Group of Mobile Robots Moving in the Convoy Type Formation

S. L. Zenkevich, mr.zenkev@mail.ru, Hua Zhu, zhuhua1302@gmail.com✉, Robotics Training-Research Center, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Hua Zhu, Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: zhuhua1302@gmail.com

Received on April 25, 2016

Accepted on May 11, 2016

In this paper we present the method of control of mobile robots moving in the convoy type formation. The problem of localization of robots, using relative observations between the robots, is solved. The relative position and relative orientation are estimated using an Extend Kalman Filter. Special attention is given to obtain a follower robot motion control law along the trajectory given by the leading robot. The simulation results are also presented.

Keywords: group, mobile robots, convoy, localization, relative observations, motion control, time delay

For citation:

Zenkevich S. L., Hua Zhu. Control of a Group of Mobile Robots Moving in the Convoy Type Formation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 30–34.

DOI: 10.17587/mau.18.30-34

References

1. Das K., Fierro R., Kumar V., Ostrowski J. P., Spletzer J., Taylor C. J. A vision-based formation control framework, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, vol. 18, no. 5, pp. 813–825.

2. **Chiem S., Cervera E.** Vision-based robot formations with Bezier trajectories, Proc.s of the 8th Conference on Intelligent and Autonomous System, 2004, pp. 191–198.
3. **Yazbeck J., Scheuer A., Charpillet F.** Optimized lateral control for a decentralized near-to-near platooning, *INRIA, Tech. Rep.*, 2013.
4. **Thuilot B., Bom J., Marmoiton F., Martinet P.** Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic GPS sensor, Proc. of 5th *IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*, Lisboa (Portugal), 2004.
5. **Yazbeck J., Scheuer A., Charpillet F.** Decentralized Near-to-Near Approach for Vehicle Platooning based on Memorization and Heuristic Search, *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2014, pp. 631–638.
6. **Mark Daniel Ollis.** Position estimation and vehicle control in autonomous multi-vehicle convoys, Patent Application Publication, Pub. № : US 2014/0309836 A1.
7. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V.** *Sistema upravlenija mobil'nogo robota* (System of control mobile robot), *Journal of Bauman Moscow State Technical University*, ser. "Instrumentation", 2006, no. 3, pp. 31–51 (in Russian).
8. **Chen Haoyao.** Towards Multi-Robot Formations: Study on Vision Based Localization Systems, available at: <http://hdl.handle.net/2031/5836> (date of access: 23.09.2015).
9. **Espinosa F., Santos C.** Odometry and laser scanner fusion based on a discrete extended Kalman filter for robotic platooning guidance, *Sensors*, 2011, no. 11, pp. 8339–8357.
10. **Zenkevich S. L. and others.** Certificate of author, 1977, N 103384 (in Russian).
11. **Sage A. P., Melsa J. L.** *Estimation Theory with Applications to Communication and control*, New York: McGraw-Hill, 1971, 529 p.

УДК 004.896:621.865.8

DOI: 10.17587/mau/18.34-40

М. А. Аль Аккад, канд. техн. наук, доц., aimanakkad@yandex.ru,

И. В. Абрамов, д-р техн. наук, проф., abramov@istu.ru,

В. В. Хворенков, д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе, hvv@istu.ru,

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск

Обратная кинематическая задача для управления амбидекстральными конечностями человекоподобного робота

Рассмотрены особенности руки робота как объекта управления, представлена ее кинематическая схема. Приводятся результаты анализа и реализации обратной кинематической задачи управления амбидекстральными конечностями человекоподобного робота, а также описание проблемно-ориентированного захвата объектов.

Ключевые слова: рука робота, снижение сложности, проблемно-ориентированное управление, координация в многоагентных системах

Введение

Сегодня цель исследований, направленных на разработку двуруких роботов, состоит в том, чтобы сделать их настоящими партнерами человека в различных сферах, включающих космические исследования, помощь инвалидам, производство и др. При этом необходимо обеспечить возможность манипуляций различными инструментами, такими как медицинские инструменты и устройства промышленного назначения. В данном контексте решение задачи координации и управления манипуляторами робота становится одной из приоритетных задач различных научных исследований.

Исследование Г. Грюнвальда и др. расширяет законономию захвата Каткоскиса одной рукой для бимануальных захватов [8]. Для манипуляций, ориентированных на цель, две руки физически не взаимодействуют друг с другом, но обе решают одну и ту же задачу (например, нажатие различных клавиш на клавиатуре). При этом в случае несогласованной манипуляции две руки выполняют две различные задачи, при согласованной манипуляции руки робота выполняют разные части одной и той же задачи (манипуляции, ориентированные на цель, и бимануальные манипуляции). Первое определение определяет системы, которые могут состоять из двух

отдельных манипуляторов, выполняющих задачи независимо друг от друга. Так как в данном случае явная координация отсутствует, нет принципиальной разницы по сравнению с системой с одним манипулятором, и анализ не должен отличаться от условий работы с одним манипулятором. Т. Вимбок и др. [9] выделяют две категории управления манипуляторами, к первой относят управление двумя манипуляторами с установленными захватами, ко второй — манипуляции объектом с помощью пальцев. В исследованиях М. Т. Сиокарле и П. К. Аллена [10], М. Габичини и А. Бичи [11], посвященных синтезу захвата, предложена концепция синергии положений или подпространства конфигурации руки для малоприводных систем взаимодействующих манипуляторов. Дополнительно описано использование позиционной системы технического зрения для управления двумя манипуляторами робота и встроенных в захватное устройство на каждой руке камер, использующихся для корректировки положения деталей в каждой руке и выполнения задачи сборки. Е. Грибовская и А. Биллард [12] предлагают концепцию программирования двух манипуляторов путем демонстрации. Действия двух манипуляторов классифицируются на основе пространственных отношений между траекториями рук, выполняющих согласованные действия.

Исследованию кинематики и синтезу управления двумя манипуляторами посвящено немало работ отечественных ученых [13–15]. И. А. Орлов, Е. В. Корягин рассматривают работу робота с одним предметом в двумерной плоскости, при этом конечности робота не являются антропоморфными [14, 15]. В исследованиях А. Г. Лескова и др. приводятся результаты экспериментальных исследований алгоритмов управления движением двуруких роботов при наличии механической связи между руками. При этом рассмотрены случаи, когда алгоритмы основаны как на задании общей плановой траектории движения, так и на задании траектории только для ведущей руки (вторая рука при этом движется в податливом режиме) [13].

Таким образом, анализ существующих технологий и методов показывает, что в основном используется бимануальное функционирование двух отдельных манипуляторов, чаще всего они не рассматриваются как одно целое, кроме того, управление основано на системе технического зрения.

Особенностью данной работы является то, что в ней два манипулятора робота рассматриваются как одно целое; при этом система технического зрения используется не для всех, а лишь для некоторых задач, так как авторы полагают, что некоторые задачи являются систематическими и не требуют работы с визуальными данными, другие задачи могут быть выполнены на основе тактильного восприятия. С учетом всего вышесказанного целью данной работы является *снижение сложности* процесса управления рукой робота за счет сокращения степеней свободы и *реализация объектно-ориентированного управления*, рассматривающего две руки робота как единое целое.

1. Особенности руки робота как объекта управления

В задачах управления человеческой рукой во время захвата преобладает рассмотрение движения в конфигурационном пространстве уменьшенной размерности. Эта размерность определена для конечного числа моделей задач захвата, которые используются для получения алгоритмов планирования, обеспечивающих стабильный захват и предлагающих единый подход к управлению одной или двумя руками при различных ограничениях. Существует необходимость разработки проблемно-ориентированного алгоритма управления одной или двумя руками робота независимо от его комплектации в качестве промежуточного решения для управления манипуляторами [1, 2].

Несмотря на сложность строения руки человека, большая часть вариантов моделей конфигурации рук человека и их движений может быть описана посредством нескольких параметров. Выполнение действий захвата различных объектов и их анализ показали, что предпочтение отдается не отдельным компонентам движения, а комбинированным действиям, которые приводят к сокращению числа степеней свободы (СС), что может быть использовано для сни-

жения степени сложности алгоритма управления и повышения эффективности системы в целом [3, 4]. Конечности робота можно разделить на три типа:

- *манипулятор встроенного типа*, который имеет независимую структуру и может быть использован для разных типов конечностей робота; движение его пальцев осуществляется с помощью двигателей, установленных внутри пальца или ладони; суставы приводятся в движение прямым приводом или зубчатой передачей;
- *внешний манипулятор*, в котором пальцы имеют простую и легкую структуру, и используется ременная или проволочная передача, а пальцы механически соединены с внешними приводами;
- *комбинированный тип*, использующий преимущества обоих типов [5].

Каждая рука может быть изучена в двух конфигурациях — один большой палец и четыре остальных пальца. Модель руки с 24 степенями свободы используется в качестве основы для сравнения упрощенных моделей руки с меньшим, чем 24, числом степеней свободы. Для того чтобы получить упрощенные модели руки, используются кинематические ограничения, которые позволяют сократить число независимых переменных или сочленений в исходной модели. Многие манипуляции, требующие схожих движений пальцев, например, жест с участием пяти пальцев, можно упростить, используя информацию только о трех пальцах, в данном случае этими тремя пальцами могут быть большой, указательный и безымянный. Используя данные о движении указательного пальца, можно воссоздать движение среднего пальца, используя информацию о безымянном пальце, можно воссоздать движение мизинца [6]. Отведение большого и указательного пальцев очень важно, так как, по крайней мере, одна степень свободы для этих пальцев рассматривается в качестве независимой переменной во всех упрощенных моделях руки. Сгибание в дистальном межфаланговом сочленении указательного пальца включено во все упрощенные модели руки. Сведение/разведение в трапециопястном сочленении большого пальца важно, так как при сгибании в межфаланговом сочленении может быть получен контакт с остальными пальцами. Универсальные сочленения большого и указательного пальцев очень важны для получения упрощенных моделей руки, так как представляют важную информацию. Таким образом, основной упор делается на снижение сложности управления и сокращение числа необходимых приводов.

2. Обратная кинематическая задача

В рамках решения обратной кинематической задачи необходимо определить углы движения манипулятора для обеспечения совпадения начальных и конечных точек захвата заданного объекта. Кинематическая модель двух конечностей состоит из 19 звеньев и 24 сочленений (степеней свободы).

Звенья и сочленения пальцев (большого (Thumb), указательного (Index), среднего (Middle), безымянного (Ring), мизинца (Little)) определяются через длины L_{ij} и углы вращения вокруг оси z , θ_{ij} , где $i = 1, \dots, 9$ показывает номер сочленения, а $j = T, I, M, R, L$ определяет рассматриваемый палец. В тексте индекс j используется для обозначения звеньев и сочленений при необходимости.

Конфигурация большого пальца: три звена (длиной L_i) — пястное (L_1), проксимальное (L_2) и дистальное (L_3) — и четыре сочленения (с углами θ_i) — фаланговое (θ_1), межфаланговое (θ_2) и трапециопястное, заданное сочленением с двумя степенями

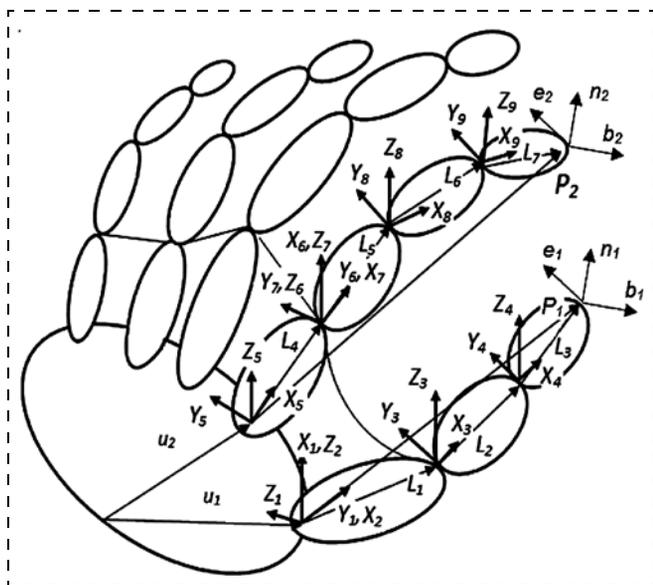


Рис. 1. Кинематическая схема сочленений пальцев

Таблица 1

Параметры Денавита—Хартенберга для большого пальца

i	Левая рука				Правая рука			
	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}
1	θ_1	0	0	$\pi/2$	θ_1	0	0	$-\pi/2$
2	θ_2	0	L_1	0	θ_2	0	L_1	0
3	θ_3	0	L_2	0	θ_3	0	L_2	0
4	θ_4	0	L_3	0	θ_4	0	L_3	0

Таблица 2

Параметры Денавита—Хартенберга для указательного, безымянного, среднего пальцев и мизинца

i	Левая рука				Правая рука			
	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}
5	θ_5	0	L_4	$\pi/2$	θ_5	0	L_4	$-\pi/2$
6	θ_6	0	0	$-\pi/2$	θ_6	0	0	$+\pi/2$
7	θ_7	0	L_5	0	θ_7	0	L_5	0
8	θ_8	0	L_6	0	θ_8	0	L_6	0
9	θ_9	0	L_7	0	θ_9	0	L_7	0

свободы, определяющими сведение/разведение (θ_3) и сгибание/разгибание (θ_4). Сочленение θ_5 позволяет смоделировать изгиб ладони, деформацию ладони при захвате мяча или аналогичных объектов.

Конфигурация указательного, среднего, безымянного пальцев и мизинца: четыре звена — пястное (L_4), проксимальное (L_5), среднее (L_6) и дистальное (L_7) — и пять сочленений — запястно-пястное (θ_5), проксимальное межфаланговое (θ_6), дистальное межфаланговое (θ_7) и два пястных, заданных сочленением с двумя степенями свободы, которые определяют вращательные движения сведения/разведения (θ_8) и сгибания/разгибания (θ_9). Кинематическая схема руки представлена на рис. 1, а четыре параметра для описания движения (параметры Денавита—Хартенберга [16]: α — угол вращения вокруг оси x ; a — перемещение вдоль оси x ; d — перемещение вдоль оси z и θ — угол вращения вокруг оси z) для большого пальца приведены в табл. 1.

Таким образом, матрица, показывающая положение и ориентацию кончика большого пальца по отношению к центру запястья, может быть представлена как произведение матрицы, представляющей положение кончика большого пальца относительно системы координат большого пальца, и матрицы, учитывающей систему координат запястья:

$$p_i = {}^{-1}_0T_i(u_i) \cdot {}^0_4T_i(\theta_i) = {}^{-1}_0T_i(u_i) \cdot {}^0_1T_i(\theta_1) \cdot {}^1_2T_i(\theta_2) \cdot {}^2_3T_i(\theta_3) \cdot {}^3_4T_i(\theta_4), \quad (1)$$

где ${}^{-1}_0T_i(u_i)$ — матрица, которая учитывает систему координат запястья, u_i — вектор между центром запястья и системой координат большого пальца; ${}^0_4T_i(\theta_i)$ — однородная матрица, представляющая положение кончика большого пальца относительно системы координат большого пальца:

$${}^{-1}_0T(u_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & u_{ix} \\ 0 & 1 & 0 & u_{iy} \\ 0 & 0 & 1 & u_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} n_{1x} & e_{1x} & b_{1x} & p_{1x} \\ n_{1y} & e_{1y} & b_{1y} & p_{1y} \\ n_{1z} & e_{1z} & b_{1z} & p_{1z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где n_i, e_i, b_i — векторы, определяющие положение и ориентацию кончика соответствующего пальца.

В табл. 2 приведены параметры Денавита—Хартенберга для указательного, безымянного, среднего пальцев и мизинца.

Матрица, которая описывает положение и ориентацию кончика i -го пальца по отношению к центру запястья:

$$p_i = {}^{-1}_0T_i(u_i) \cdot {}^0_5T_i(\theta_i) = \\ = {}^{-1}_0T_i(u_i) \cdot {}^0_1T_i(\theta_5) \cdot {}^1_2T_i(\theta_6) \cdot {}^2_3T_i(\theta_7) \cdot {}^3_4T_i(\theta_8) \cdot {}^4_5T_i(\theta_9), \quad (4)$$

где ${}^{-1}_0T_i(u_i)$ — матрица, которая учитывает систему координат запястья, u_i представляет собой вектор между центром запястья и системой координат i -го пальца; ${}^0_5T_i(\theta_i)$ — однородная матрица для системы координат i -го пальца и соответствующего кончика i -го пальца:

$${}^{-1}_0T_i(u_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & u_x \\ 0 & 1 & 0 & u_y \\ 0 & 0 & 1 & u_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$${}^0_5T_i = \begin{bmatrix} n_{2x} & e_{2x} & b_{2x} & p_{2x} \\ n_{2y} & e_{2y} & b_{2y} & p_{2y} \\ n_{2z} & e_{2z} & b_{2z} & p_{2z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для решения обратной кинематической задачи сначала необходимо определить ориентацию и конечное положение кончика каждого пальца:

$$\theta_5 = \arctan[b_{2y}/b_{2x}] \text{ (для левой руки),} \\ \theta_5 = -\arctan[b_{2y}/b_{2x}] \text{ (для правой руки);}$$

$$\theta_6 = \arctan[b_{2x}/\cos\theta_5/b_{2z}] \text{ (для левой руки),} \\ \theta_6 = \arctan[b_{2x}/\cos\theta_5/b_{2z}] \text{ (для правой руки).}$$

Из геометрических соотношений между векторами и длинами (рис. 1) для обеих рук находим:

$$v_2 = p_2 - [L_7 n_2]; \quad h_x = L_4 \cos\theta_5, \quad h_y = L_4 \sin\theta_5, \quad h_z = 0, \\ h = [h_x \ h_y \ h_z]^T; \quad r = v_2 - h, \quad r_2 = \text{norm}v_2, \quad r_3 = \text{norm}r.$$

Используя векторы r_2 , r_3 и длины L_4 , L_5 , L_6 , получаем вспомогательные углы β_4 , β_5 и β_6 :

$$\beta_4 = \arccos\left(\frac{L_4^2 + r_3^2 - r_2^2}{2L_4 r_3}\right), \quad \beta_5 = \arccos\left(\frac{L_5^2 + r_3^2 - L_6^2}{2L_5 r_3}\right), \\ \beta_6 = \arccos\left(\frac{L_6^2 + L_5^2 - r_3^2}{2L_6 L_5}\right).$$

Угол сгибания/разгибания в пястном сочленении получаем в виде

$$\theta_7 = \pi - \beta_5 - \beta_4.$$

Угол разгибания и перегиба (гиперэкстензия) в пястном сочленении получаем в виде

$$\theta_{7hyp} = \beta_4 - \pi - \beta_5.$$

Угол проксимального межфалангового сочленения:

$$\theta_8 = \pi - \beta_6.$$

В заключение алгебраическим путем получаем угол дистального межфалангового сочленения:

$$\theta_9 = \arctan2[k_2, k_1],$$

где

$$k_1 = (c_2 c_4 c_3 c_1 - c_4 s_1 s_3 - c_2 s_4 c_1 s_3 - s_4 c_3 s_1) n_x + \\ + (c_2 c_4 c_3 s_1 + c_4 c_1 s_3 - c_2 s_4 s_1 s_3 + s_4 c_3 c_1) n_y + \\ + ((s_4 s_3 - c_4 c_3) s_2) n_z; \\ k_2 = (-s_4 c_2 c_1 c_3 + s_4 s_1 s_3 - c_4 c_1 c_2 s_3 - c_4 c_3 s_1) n_x + \\ + (-s_4 c_2 s_1 c_3 - s_4 c_1 s_3 - c_4 s_1 c_2 s_3 + c_4 c_3 c_1) n_y + \\ + ((c_4 s_3 + s_4 c_3) s_2) n_z;$$

здесь $s_i = \sin\theta_i$, $c_i = \cos\theta_i$, аналогично для других s_i и c_i , где $i = 2, 3, 4$;

$$\theta_1 = \arctan\left[\frac{p_{1y}}{p_{1x}}\right] \text{ (для левой руки),}$$

$$\theta_1 = -\arctan\left[\frac{p_{1y}}{p_{1x}}\right] \text{ (для правой руки).}$$

Для обеих рук:

$$v_1 = p_1 - [L_3 n_1], \quad r_1 = \text{norm}v_1,$$

$$x_1 = \frac{r_1 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2}, \quad x_2 = \sqrt{1 - x_1^2}, \quad x_3 = L_1 + L_2 x_1,$$

$$x_4 = L_2 x_2, \quad v_{1xy} = \sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2},$$

$$x_5 = \frac{v_{1z} x_4 + v_{1xy} x_3}{x_3^2 + x_4^2}, \quad x_6 = \frac{v_{1z} x_3 + v_{1xy} x_4}{x_3^2 + x_4^2},$$

$$\theta_3 = \arctan2[x_2, x_1], \quad \theta_2 = \arctan2[x_6, x_5],$$

$$\theta = \arctan2\left[n_{1z}, \sqrt{n_{1x}^2 + n_{1y}^2}\right], \quad \theta_4 = \theta - \theta_2 - \theta_3.$$

Угол θ_2 используется для обеспечения стабильного захвата в зависимости от задачи.

3. Проблемно-ориентированный метод захвата

Представим руку робота в виде трех звеньев: собственно рука (предплечье и плечо), запястье и кисть. Выполнение любого задания требует координации управления этими тремя секторами для правой и левой рук. Предплечье и плечо отвечают за позиционирование запястья в пространстве; их кинематика была изучена в работе [7], также были предложены методы координации двух рук и пред-

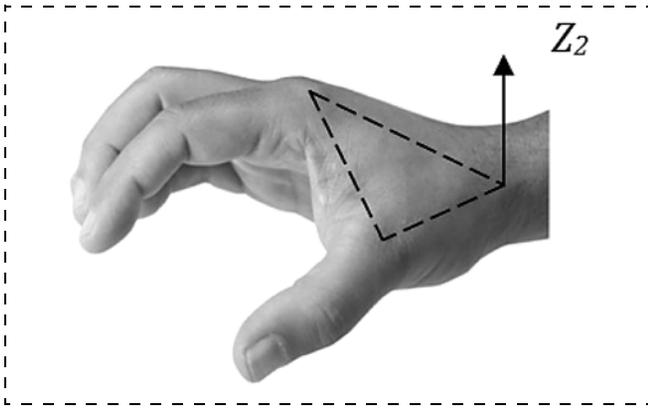


Рис. 2. Нормаль ориентации руки

отвращения столкновений. Запястье отвечает за ориентацию кисти. Кисть выполняет захват, она включает две составляющие, действующие вместе: большой палец и четыре остальных пальца. Для координации и контроля за перемещением рук и для левой, и для правой руки будет использоваться угол наклона нормали треугольника, образованного большим и указательным пальцами руки (сочленения 2, 3, 5) по отношению к установленной системе координат, как показано на рис. 2. Нормаль является осью Z_2 кинематической системы, показанной на рис. 1. Данный угол наклона будет использоваться совместно с углом наклона нормали центра тяжести объекта θ , для того чтобы обеспечить стабильный обхват в зависимости от поставленной задачи, как показано на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

При движении кисти к объекту или двум разным объектам с намерением их обхватить (рис. 3, б) заранее обозначим на каждой руке точки контакта, которые образуют огибающую кривую. По мере движения данная кривая постепенно принимает форму поверхности объекта или его части для достижения стабильного состояния обхвата. При выполнении определенного задания обозначенные точки должны находиться в контакте с выбранными точками на поверхности объекта, которые, как мы предполагаем, лежат на двумерной плоскости сечения трехмерной модели объекта. Сочетание контактных точек на руке соответствует выбранным точкам сечения, таким образом, используя алгоритм коррекции кривизны, мы можем достичь требуемого стабильного обхвата. Будем считать, что число кривых сечений (сплайнов) равно числу пальцев руки, т.е. равно пяти, как показано на рис. 4. Контуры кривых по контактным точкам руки S_a будут корректироваться в зависимости от кривых трехмерной модели S_r , которые принимаются в качестве базового контура, как показано на рис. 5, с учетом того, что обхват и коррекция положения руки являются равномерными и пошаговыми [17].

R — центр окружности, в которую вписан объект, принимается в качестве начала координат (рис. 5),

при этом m — число особых точек кривых, которые выбираются с постоянным интервалом $\theta = 360^\circ/m$ относительно вертикального вектора P_r , где

$v_{ri} = (r_i, \theta)$ — векторы расположения особых точек кривых объекта;

$v_{ai} = (r_{ai}, \theta)$ — векторы расположения соответствующих точек кривых руки;

$i = 1, 2, \dots, N; N = 5$ — число кривых (сплайнов);

$$\Delta s = \sum_{i=1}^m |v_{ri} - v_{ai}|; \Delta v_i = |v_{ri} - v_{ai}|.$$

Если $\Delta v_i > 0$, прибавляем его к v_{ai} ; если $\Delta v_i < 0$, вычитаем его из v_{ai} , пока Δs не станет равным 0. Затем сохраняем данную разницу или величины коррекции в поля таблицы (одна запись таблицы для одного сечения), чтобы позднее использовать их в системе.

Вектор центра тяжести v_g рассчитывается по формуле

$$v_g = \frac{\sum_{i=1}^m |v_{ri}| I_{ri}}{\sum_{i=1}^m I_{ri}},$$

где I_{ri} — яркость изображения на границах сплайнов объекта, при этом делается допущение, что масса сечения сосредоточена на границах сплайнов объекта.

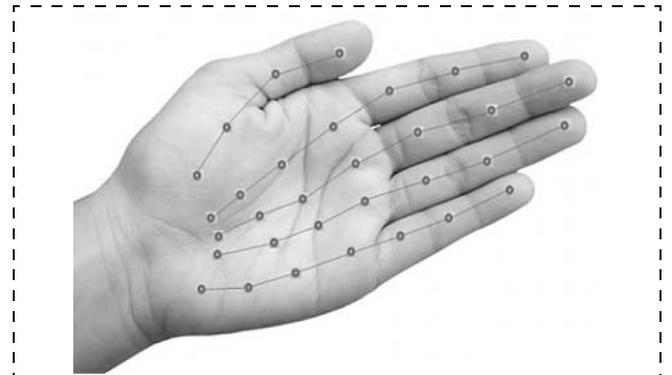


Рис. 4. Контактные точки руки и контуры образованных кривых

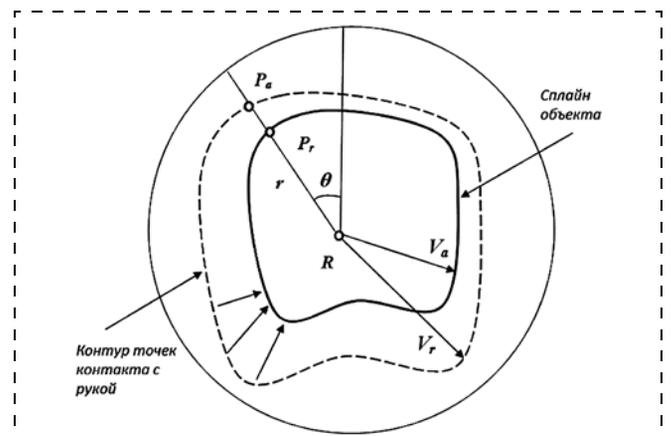


Рис. 5. Пример кривых обхвата и объекта

4. Эксперимент и результаты

Для определения рабочего пространства пальцев была измерена максимальная и минимальная разница углов звеньев (табл. 3).

Таблица 3

Диапазон движения пальцев

θ	Диапазон движений, °							
	min				max			
θ_1	0				60			
θ_2	-10				55			
θ_3	-25				35			
θ_4	-15				80			
	<i>I</i>	<i>M</i>	<i>R</i>	<i>L</i>	<i>I</i>	<i>M</i>	<i>R</i>	<i>L</i>
θ_5	-30	-30	-30	-30	10	10	10	10
θ_6	-30	-8	-14	-19	30	35	20	33
θ_7	-10	0	0	0	90	80	80	80
θ_8	0	0	0	0	90	100	100	100
θ_9	0	-10	-20	-30	60	90	90	90

Данные, полученные в результате эксперимента, будут далее использованы для анализа динамики, планирования траектории и управления движением манипулятора робота.

Результаты эксперимента также подтверждают, что движения пальцев в сочленениях являются ограниченными вследствие межпальцевых ограничений — средний, безымянный пальцы и мизинец имеют общую пястную связку, которая способствует возникновению некоторых дополнительных движений:

$$\theta_{7R} \approx 2/3 \theta_{7M} \approx 7/12 \theta_{7L}, \theta_{7R} - \theta_{7M} < 60^\circ, \\ \theta_{7R} - \theta_{7L} < 50^\circ, \theta_{6R} \approx \theta_{6L}, \theta_{7M} \approx 1/5 \theta_{7I};$$

внутрипальцевых ограничений — в зависимости от внутренних сочленений:

$$\theta_9 \approx 2/3 \theta_8, \theta_7 \approx 4/3 \theta_8, \theta_2 \approx 11/10 \theta_3, \\ \theta_3 \approx 4/5 \theta_4, \theta_{5I} \approx \theta_{5M}, \theta_{5M} \approx 1/2 \theta_{5R},$$

$$\theta_{6M} \approx 1/5 \theta_{6I}, \theta_{5R} \approx 2/3 \theta_{5L}, \theta_{6R} \approx 1/2 \theta_{6L}, \\ \theta_{9R} \approx 1/2(\theta_{9M} + \theta_{9L}) \text{ (круговой захват).}$$

$$\theta_7 \approx 3/2 \theta_8, \theta_8 \approx 2 \theta_9, \theta_{2T} \approx 10/11 \theta_{3T}, \\ \theta_{3T} \approx 6/5 \theta_{4T} \text{ (призматический захват).}$$

Заключение

Конечности человекоподобного робота предназначены для использования в тех областях, где необходимо выполнить определенную последовательность задач, например, в качестве протезов для

людей с ограниченными возможностями, в качестве вспомогательных устройств в работе пожарных, спасателей, на производстве, в хирургии и в качестве платформы для исследований и т.п. Конфигурация, в которой задействовано несколько манипуляторов, требует четкой координации между ними.

Список литературы

1. Li Y., Pollard N. S. A shape matching algorithm for synthesizing humanlike enveloping grasp // IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots: сб. ст. Междунар. конференции (Цукуба, 2005 г.). Цукуба, 2005. С. 442—449.
2. Liu J., Zhang Y. Mapping human hand motion to dexterous robotic hand // ROBIO — IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics: сб. ст. Междунар. конференции (Санья, 2007 г.). Санья, 2007. С. 829—834.
3. Goldfeder C., Allen P., Lackner C., Pelosoff R. Grasp planning via decomposition // IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation: сб. ст. Междунар. конференции (Рим, 2007 г.). Рим, 2007.
4. Tsoli A., Jenkins O. C. 2D subspaces for user-driven robot grasping // Robotics, Science and Systems Conference: Workshop on Robot Manipulation: сб. ст. Междунар. конференции. США, 2007.
5. Liu H., Meusel P., Hirzinger G., Jin M., Liu Y., Xie Z. The Modular Multisensory DLR-HIT-Hand: Hardware and Software Architecture // IEEE/ASME Transactions on mechatronics: сб. ст. Междунар. конференции. 2008. Т. 13, № 4. С. 461—469.
6. Rößling F., Haschke R., Steil J., Ritter H. Platform Portable Anthropomorphic Grasping with the Bielefeld 20-DOF Shadow and 9-DOF TUM Hand // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: сб. ст. Междунар. конференции, 2007. С. 2951—2956.
7. Al Akkad M. A. Exploiting two ambidextrous robotic arms for achieving cooperative tasks // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2014. № 4. С. 134—139.
8. Grunwald G., Borst C., and Zollner J. Benchmarking dexterous dual-arm/hand robotic manipulation // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop on Performance Evaluation and Benchmarking: сб. ст. Междунар. Конференции (Ницца, 2008). Ницца, 2008.
9. Wimbock T., Ott C., Prassler E., Zollner M., Bischo R., Burgard W., Haschke R., Hagele M., Lawitzky G., Nebel B., Ploger P., Reiser U. Dual-arm manipulation // Towards Service Robots for Everyday Environments, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics. Eds. Springer Berlin, Heidelberg, 2012. Т. 76. С. 353—366.
10. Ciocarlie M. T., Allen P. K. Hand posture subspaces for dexterous robotic grasping // The International Journal of Robotics Research. 2009. Т. 28, № 7. С. 851—867.
11. Gabbicini M., Bicchi A., Prattichizzo D., Malvezzi M. On the role of hand synergies in the optimal choice of grasping forces // Autonomous Robots. Springer. 2011. С. 235—252.
12. Gribovskaya E., Billard A. Combining dynamical systems control and programming by demonstration for teaching discrete bi-manual coordination tasks to a humanoid robot // 3 IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction: сб. ст. Междунар. конференции (Амстердам, 2008). Амстердам, 2008. С. 33—40.
13. Лесков А. Г., Илларионов В. В. Математическое и полунатурное моделирование операций космических манипуляционных роботов // Пилотируемые полеты в космос: Тезисы докл. 8-й Междунар. науч.-практич. конф. Звездный городок, 2009. С. 70—71.
14. Орлов И. А. Синтез движения манипуляционных систем для пространств со сложными связями и ограничениями: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Институт прикладной математики имени Келдыша М. В. Москва, 2013.
15. Корягин Е. В. Разработка высокоуровневой системы управления антропоморфным роботом // Нейроинформатика. 2013. Т. 7, № 1.
16. Craig J. J. Introduction to Robotics Mechanics, 3rd edition, Pearson Prentice Hall, 2005.
17. Pivarciova E., Bojek P., Al Akkad M. A., Yakomovitch B. A. Automated Systems of Image Verification: монография. Gliwice, Polland: PA NOVA, 2015. С. 130—206.

Inverse Kinematic Analysis for Control of Human-Like Ambidextrous Robotic Hands

M. A. Al Akkad, aimanakkad@yandex.ru✉, I. V. Abramov, abramov@istu.ru,
V. V. Khvorenkov, hw@istu.ru,

M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, 426069, Russian Federation

Corresponding author: Al Akkad M. A., Ph. D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechatronic Systems, M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, 426069, Russian Federation, e-mail: aimanakkad@yandex.com

Received on April 11, 2015

Accepted on May 15, 2015

This paper discusses the design of two human-like robotic hands. The kinematics of this design was introduced to offer a more generic, speedy, and precise solution for a wide range of robotic applications. This research is focused on integration of the control of both arms and hands as one entity. A solution involving several manipulators requires coordination between them. In order to arrange a stable grasp, the angle of inclination of the predefined hand orientation normal was used with the angle of inclination of the object's center of gravity vector. The center of the gravity vector was calculated using the image intensity of the object splines. The splines of the predefined hand contact points were adapted to the object 3D model splines. The maximal and minimal values of the joints' angle ranges were measured to define the fingers' workspace. Gestures were classified as prismatic and circular, regardless of the grasping power or precision, while the circular grasping implied a strong correlation among the finger joints. The human-like hands were intended for many applications involving a specific series of tasks like artificial limbs of the handicapped people, they were also meant for the fire fighters, production workers, surgeons, and for use as a research platform.

Keywords: robotic hands, complexity reduction, task-oriented control, mechanism drive, multi-agent coordination

For citation:

Al Akkad M. A., Abramov I. V., Khvorenkov V. V. Inverse Kinematic Analysis for Control of Human-Like Ambidextrous Robotic Hands, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no 12, pp. 34–40.

DOI: 10.17587/mau/16.34-40

References

1. Li Y., Pollard N. S. A shape matching algorithm for synthesizing humanlike enveloping grasp, *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Tsukuba, 2005, pp. 442–449.
2. Liu J., Zhang Y. Mapping human hand motion to dexterous robotic hand, *Proc. of ROBOTICS – IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Sanya, 2007, pp. 829–834.
3. Goldfeder C., Allen P., Lackner C., Pelosoff R. Grasp planning via decomposition, *Proc. of IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, Rome, 2007.
4. Tsoli A., Jenkins O. C. 2D subspaces for user-driven robot grasping, *Proc. of Robotics, Science and Systems Conference: Workshop on Robot Manipulation*, USA, 2007.
5. Liu H., Meusel P., Hirzinger G., Jin M., Liu Y., Xie Z. The Modular Multisensory DLR-HIT-Hand: Hardware and Software Architecture, *Proc. of IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 2008, vol.13, no. 4, pp. 461–469.
6. Røthling F., Haschke R., Steil J. J., Ritter H. Platform Portable Anthropomorphic Grasping with the Bielefeld 20-DOF Shadow and 9-DOF TUM Hand, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp. 2951–2956.
7. Al Akkad M. A. Exploiting two ambidextrous robotic arms for achieving cooperative tasks, *Vestnik Izhevskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*, 2014, no. 4, pp. 134–139.
8. Grunwald G., Borst C., Zilner J. Benchmarking dexterous dualarm/hand robotic manipulation, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop on Performance Evaluation and Benchmarking*, Nice, 2008.
9. Wimbock T., Ott C., Prassler E., Zollner M., Bischo R., Burgard W., Haschke R., Hagele M., Lawitzky G., Nebel B., Ploger P., Reiser U. Dual-arm manipulation, *Towards Service Robots for Everyday Environments*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics, Eds. Springer Berlin, Heidelberg, 2012, vol. 76, pp. 353–366.
10. Ciocarlie M. T., Allen P. K. Hand posture subspaces for dexterous robotic grasping, *The International Journal of Robotics Research*, 2009, vol. 28, no. 7, pp. 851–867.
11. Gabbicini M., Bicchi A., Prattichizzo D., Malvezzi M. On the role of hand synergies in the optimal choice of grasping forces, *Autonomous Robots*, Springer, 2011, pp. 235–252.
12. Gribovskaya E., Billard A. Combining dynamical systems control and programming by demonstration for teaching discrete bimanual coordination tasks to a humanoid robot, *Proc. of 3rd IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction*, Amsterdam, 2008, pp. 33–40.
13. Leskov A. G., Illarionov V. V. *Matematicheskoe i polunaturnoe modelirovanie operaciy kosmicheskikh manipulyacionnyh robotov* (Mathematical and semirealistic simulation of space robotic manipulators), *Proc. of 8 International scientific conference, Zvezdnyj gorodok*, 2009, pp. 70–71 (in Russian).
14. Orlov I. A. *Sintez dvizheniya manipulyacionnyh sistem dlya prostranstvo slozhnymi svyaziyami i ogranicheniyami* [(Synthesis of manipulation systems movements for spaces with complex relations and constraints): Ph. D. thesis, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, 2013 (in Russian)].
15. Koryagin E. V. *Razrabotka vysokourovnevnoy sistemy upravleniya antropomorfnyim robotom* [(The development of higher-level system for anthropomorphic robot control), *Neiroinformatika*, 2013, vol. 7, no. 1 (in Russian)].
16. Craig J. J. *Introduction to Robotics Mechanics*, 3rd edition, Pearson Prentice Hall, 2005.
17. Pivarciova E., Bojek P., Al Akkad M. A., Yakomovitch B. A. *Automated Systems of Image Verification*, Gliwice, Poland, PA NOVA, 2015, pp. 130–206.

А. А. Кобзев, д-р техн. наук, проф., kobzev42@mail.ru, **А. В. Лекарева**, аспирант, tasya671@rambler.ru, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Преодоление избыточности при решении задачи кинематики для руки оператора транспортного средства

Рассматриваются особенности решения обратной задачи кинематики руки оператора. Приведена кинематическая модель руки, изложены существующие подходы к решению и преодолению кинематической избыточности, проведен их анализ. Предложено применение эвристического метода FABRIK и представлены результаты его исследования.

Ключевые слова: оператор, биомеханическая модель, обратная задача кинематики, кинематическая избыточность, метод прямого и обратного следования, вектор обобщенных координат, целевая позиция

Введение

Высокие темпы развития и распространения человеко-машинных систем (ЧМС) различного назначения обуславливают значительную актуальность проблем обеспечения их надежности, эффективности и качества функционирования. Человек-оператор в таких системах является неустраняемым эргатическим звеном, работающим в режиме управления и восприятия возмущений со стороны объекта. Специфика деятельности оператора состоит в том, что он, как правило, не имеет возможности взаимодействовать с объектом управления непосредственно и вынужден пользоваться информацией, поступающей к нему по каналам связи с помощью различных устройств (дисплея, датчиков, индикаторов, радиоканала и т.п.). Очевидно, что одним из необходимых условий, обеспечивающих требуемый уровень качества функционирования системы, являются своевременные и точные действия оператора. Несоответствие возможностей техники особенностям оператора порождает проблемы организации их взаимодействия как на функциональном уровне, так и на информационной основе. Одним из путей оптимизации этого взаимодействия, с учетом физиологических особенностей человека-оператора, является математическое моделирование.

1. Постановка задачи

При моделировании поведения человека — задачи, связанной с ситуативной реализацией заданных функций человеком, — вопрос заключается в том, как человек строит и организует движения, например, как выполняет движения рукой с инструментом, какие из степеней подвижности, в каком объеме и на каких интервалах участвуют в постро-

ении движения, каковы механизмы преодоления и использования двигательной избыточности в живых организмах [1].

Взаимодействие с органами управления оператора осуществляет, как правило, посредством верхних конечностей, математическому моделированию которых и посвящена данная работа. Рука оператора представляет собой пространственный механизм, конфигурация которого определяет положение и ориентацию кисти в пространстве.

Простейшая биомеханическая модель руки человека состоит из трех твердых тел (плечо, предплечье, кисть), соединенных идеальными шарнирами, моделирующими плечевой, локтевой и лучезапястный суставы. Такое приближение справедливо для подавляющего большинства движений верхней конечности [2]. В целом, рука человека без учета пальцев кисти имеет семь степеней подвижности, ее кинематическая модель представлена на рис. 1. Плечевой сустав S представляется шарниром с тремя степенями свободы. Степени подвижности в плечевом суставе связывают: 1) с движением плеча в продольной плоскости тела, реализуемым посредством обобщенной координаты q_1 ; 2) с движением плеча в поперечной плоскости тела, за которое отвечает обобщенная координата q_2 ; 3) с вращением осей сустава локтя относительно продольной оси плеча, реализуемым координатой q_3 . Локтевой сустав E моделируется шарниром с двумя степенями свободы, соответствующим вращению предплечья относительно плеча q_4 и вращению лучевой кости относительно локтевой q_5 . Лучезапястный сустав W также отображается шарниром с двумя степенями свободы, соответствующими сгибанию—разгибанию q_6 и отведению—приведению q_7 кисти относительно предплечья.

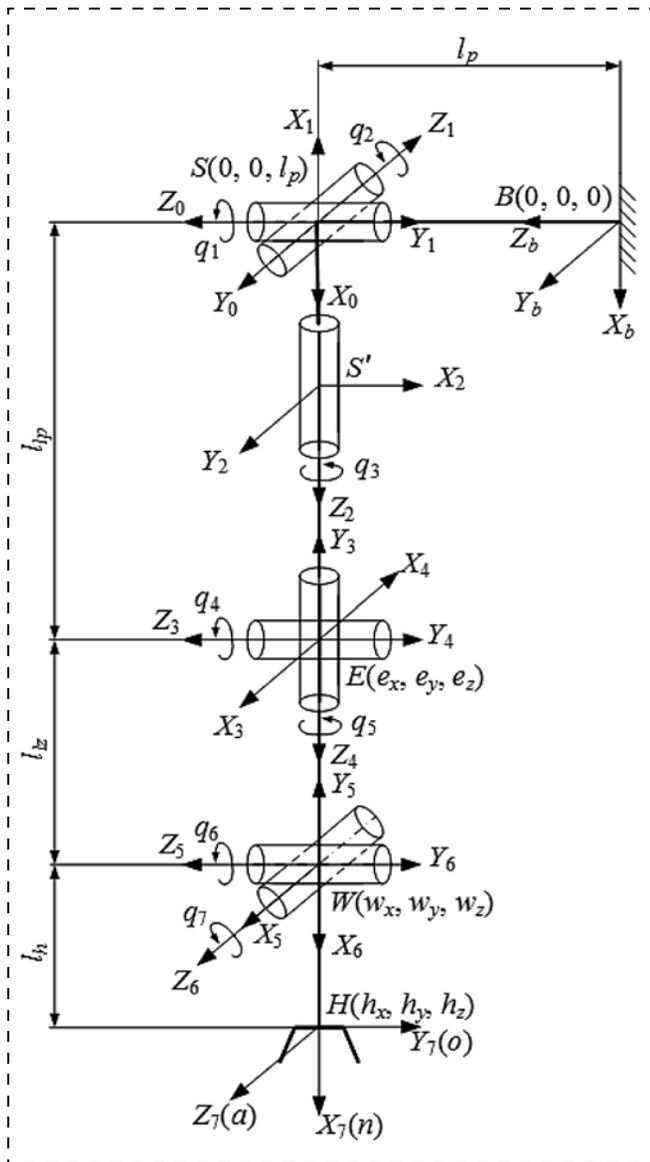


Рис. 1. Кинематическая модель руки оператора

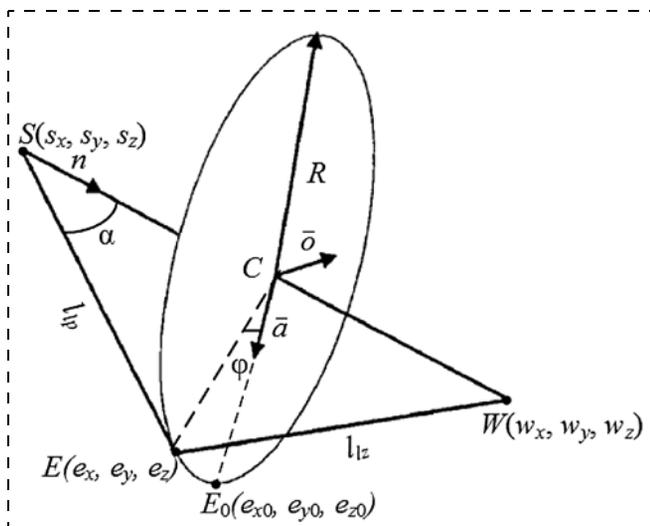


Рис. 2. Множество положений локтевого сустава

В свою очередь, биомеханическая модель кисти содержит 16 твердых тел. Кости запястья и пястные кости указательного, среднего, безымянного пальцев и мизинца образуют первое тело. Следующие 12 представляют собой проксимальную, среднюю и дистальную фаланги этих пальцев. И еще три твердых тела составляют большой палец: пястная кость, средняя и дистальная фаланги. Средний и дистальный межфаланговые суставы моделируются цилиндрическими шарнирами с одной степенью свободы, соответствующей сгибанию—разгибанию. Пястно-фаланговые суставы (для большого пальца — запястно-пястный сустав) определяются шарниром с двумя степенями свободы, соответствующим сгибанию—разгибанию и приведению—отведению [3]. Таким образом, биомеханическая модель руки человека представляет собой 18-звенную кинематическую цепь с 18 шарнирами и с 27 степенями свободы звеньев.

Моделирование перемещения руки оператора в целевую точку сродни решению обратной задачи о положениях в робототехнике, ведь, по существу, оно связано с определением конечной конфигурации (обобщенных координат) модели руки, в которой кисть находится в заданной точке с определенной ориентацией. Однако решение данной задачи в явном виде существует лишь для некоторых кинематических структур, состоящих из шести звеньев, соединенных вращательными парами пятого класса и обладающих определенными особенностями [4].

Для сложных кинематических структур, подобных руке оператора с большим числом степеней подвижности, решение данной задачи сопряжено с определенными трудностями. Одной из основных является проблема определения положения локтевого сустава при установлении конечной конфигурации руки человека в целевой позиции. Это наглядно демонстрирует тот факт, что при закреплённом положении запястья $W(w_x, w_y, w_z)$ локтевой сустав $E(e_x, e_y, e_z)$ может принимать различные позиции, лежащие в плоскости пересечения двух сфер: сферы, описываемой в пространстве плечом при вращении в плечевом суставе "в отрыве от предплечья", и сферы, описываемой при вращении предплечья в суставе запястья, условно "в отрыве от плеча". Из множества допустимых положений локтевого сустава необходимо найти наиболее подходящее (рис. 2).

2. Известные пути решения

Данная задача может быть сведена к задаче оптимизации, в качестве критерия которой целесообразно использовать так называемый принцип "нижайшего локтя", описанный Э. Накано применительно к решению задачи позиционирования антропоморфного манипулятора [5]. Согласно данному критерию конечным положением локтевого сустава является такое положение, при котором расстояние от локтевого сустава до плоскости пола минимально. Критерий оптимизации положения

локтевого сустава по принципу "нижайшего локтя" построен на той идее, согласно которой любая система стремится перейти в состояние с наименьшей энергией [5]. Справедливость применения данного критерия при моделировании движения руки оператора базируется на положениях эргономики, согласно которым человек стремится совершать движения с максимальной скоростью, минимальным временем и минимальными затратами энергии.

Решение рассматриваемой задачи с применением методов условной оптимизации многомерной скалярной функции изложено в работе [2]. На основе проведенных исследований автором выявлено, что наиболее предпочтительным является использование метода SUMT Фиакко и Маккормика как обладающего наилучшими параметрами сходимости и высокой точностью, но его применение сопряжено с определенными вычислительными затратами. Все же этот подход может быть эффективно использован для определения положения локтевого сустава при исследовании движения руки оператора без учета пальцев кисти.

Если же требуется осуществить моделирование движения всей верхней конечности оператора, включая пальцы руки, т.е. при наличии нескольких концов кинематической цепи, дальнейшее распространение данного решения довольно затруднительно. Поэтому целесообразным является поиск такого метода, который позволил бы в случае необходимости расширить решение, при этом отличался бы простотой, надежностью и малыми временными и вычислительными затратами.

Использование широко известных методов Якоби [6], методов Ньютона [7], методов нелинейного программирования [8] довольно затруднительно, поскольку данные методы требуют значительных затрат вычислительного времени при большом числе степеней подвижности. Следует также учитывать, что метод интервалов проработан только для простых кинематических цепей.

Методы CCD [9] и Triangulation Inverse Kinematics [10] разработаны только для простых кинематических цепей. При наличии нескольких конечностей их применение возможно путем расчленения механизма на несколько простых цепей и решения обратной задачи кинематики отдельно для каждой цепи. Однако для учета взаимовлияния частей механизма необходимо дополнительно проводить согласование получаемых решений. Метод

FTL [11] лишен такого недостатка и позволяет проследить взаимовлияние приводов звеньев друг на друга. Однако он не был проработан на случай нескольких концов кинематической цепи.

3. Расширение сферы метода прямого и обратного следования

Быстрейшим из методов, рассмотренных выше, согласно работам [7, 12] является метод, носящий название "Метод прямого и обратного следования" (*Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics*, далее просто *FABRIK*). Данный метод исключает громоздкость и сложность, связанную с использованием матриц вращения, путем непосредственного определения положения (точки) на прямой. Определяющими достоинствами этого метода также являются: малое число итерации, незначительные вычислительные затраты, возможность наложения ограничений и возможность использования при наличии нескольких цепей и (или) конечных точек, визуальное естественная поза, получаемая в результате решения, а также допустимость применения при незакрепленном корневом узле кинематической цепи.

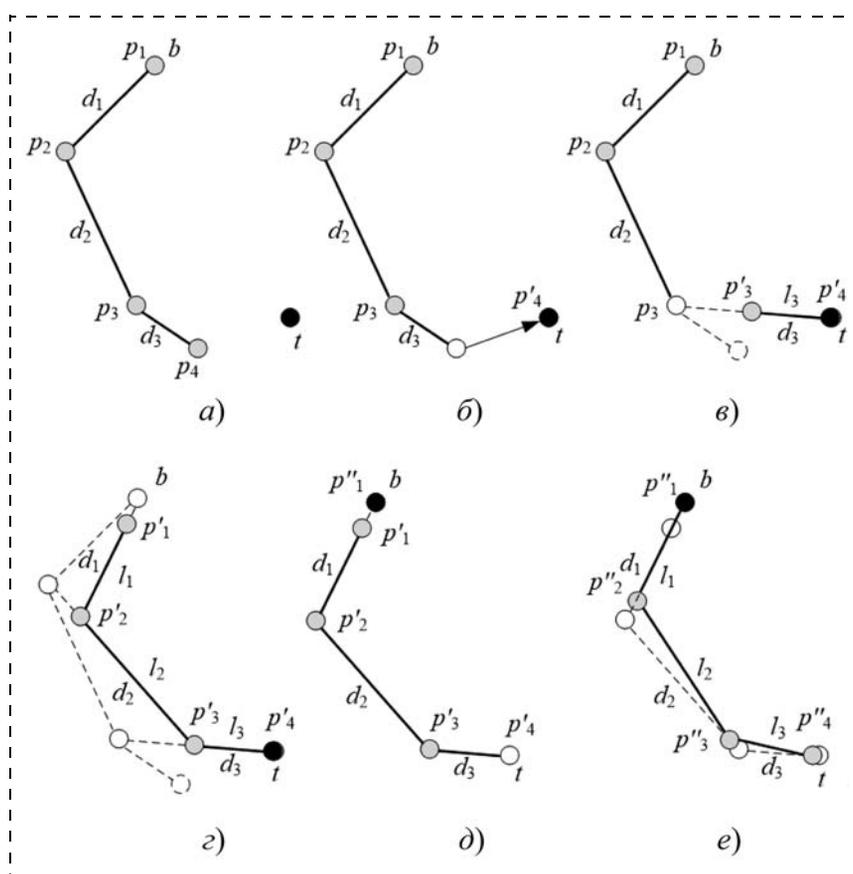


Рис. 3. Графическая интерпретация работы метода *FABRIK*:

a — начальная позиция манипулятора и целевая точка; *b* — перемещение конечного узла к цели; *в* — определение новой позиции узла p'_3 ; *г* — определение новых позиций для всех узлов кинематической цепи; *д* — перемещение корневого узла в его начальную позицию; *е* — определение новых позиций узлов при движении от корневого элемента к конечному

Рассмотрим суть метода *FABRIK*. Предположим, что множество p_1, \dots, p_n (для руки оператора без учета кисти $n = 4$) является множеством позиций узлов кинематической цепи. Ее формализация осуществляется следующим образом: конечной точкой следует считать всякий узел без дочерних элементов; для каждой конечной точки цепь может быть представлена движением по скелету "от родителя к родителю" в обратном направлении до достижения корневого узла (начала кинематической цепи). Цель представлена позицией t и начальной базовой корневой позицией. Графическая интерпретация работы полного цикла представлена на рис. 3.

Рассмотрим полный цикл работы алгоритма. На рис. 3, *a* представлена начальная позиция кинематической цепи и заданная целевая точка. Начальным шагом после указания целевой точки является расчет дистанций между узлами (массив $d[d_1, \dots, d_n]$). При этом необходимым условием выполнения алгоритма является достижимость целевой позиции, которая определяется путем сравнения расстояния между корневым узлом и целью ($dist$) и общей суммы дистанций между узлами. Если первое окажется больше второй, то цель достижима, и полный цикл ограничивается двумя этапами. Работа первого этапа начинается с оценки начальных позиций каждого узла при движении от конечного элемента p_n к корню p_1 и перемещения конечного узла p_n к цели t (рис. 3, *б*). Затем определяется новая позиция узла p'_{n-1} , находящегося на отрезке прямой l_{n-1} на расстоянии d_{n-1} от точки p_n (рис. 3, *в*). Аналогично, для вычисления новой позиции узла p'_{n-2} используется отрезок прямой l_{n-2} , проходящий через точки p'_{n-1} и p_{n-2} . В этом случае новая позиция узла p'_{n-2} определяется относительно точки p'_{n-1} дистанцией d_{n-2} . Алгоритм повторяется до тех пор, пока не будут определены новые позиции для всех узлов, включая корневой (рис. 3, *д*). После этого начинается второй этап алгоритма: корневой элемент с позиции p'_1 перемещается в его начальную позицию $b - p''_1$ (рис. 3, *д*). Повторяется определение новых позиций для всех узлов, но на этот раз движение происходит от корня к конечному узлу (рис. 3, *е*). Первый и второй этапы алгоритма повторяются до тех пор, пока позиция конечного элемента с заданной точностью ϵ не совпадет с целевой точкой.

В случаях, когда корневой элемент перемещается на необходимую позицию, *FABRIK* срабатывает так, как было описано, с тем лишь отличием, что новая позиция p''_1 корневого узла будет желаемой позицией, а не начальной. При этом, без введения ограничений, решение, полученное с применением метода *FABRIK*, сойдется на любой целевой позиции, если она достижима. Однако если

цель находится дальше дистанции, на которую может вытянуться цепь, необходимо прерывающее условие, которое сравнит прошлую и текущую позицию конечного узла, и которое прекратит выполнение алгоритма, если смещение конечного узла будет меньше некоторого значения. Также, в особых случаях, алгоритм может быть прерван по истечению некоторого числа итераций [12].

После определения новых позиций узлов кинематической цепи в пространстве можно, не прибегая к значительным усилиям, вычислить вектор обобщенных координат.

4. Определение вектора обобщенных координат руки оператора

Рассмотрим определение вектора управляющих обобщенных координат с использованием тригонометрического подхода и метода обратных преобразований.

1. *Определение обобщенной координаты q_1* . Координата q_1 отвечает за движение плечевого сустава руки оператора в продольной плоскости тела — плоскости XOY (рис. 4). Определив координаты локтевого сустава в пространстве $E(e_x, e_y, e_z)$, угловую координату q_1 можно вычислить согласно выражению

$$q_1 = \arctg \frac{e_x}{e_y},$$

где e_x, e_y — координаты локтевого сустава в плоскости XOY .

2. *Определение обобщенной координаты q_2* . Координата q_2 отвечает за движение плечевого сустава руки оператора в поперечной плоскости тела — плоскости XOZ (рис. 5, *a, б*). Из треугольника (рис. 5) ESB по теореме косинусов найдем q'_2 :

$$q'_2 = \arccos \left(\frac{l_p^2 + l_{lp}^2 - |\bar{r}_0|^2}{2l_p l_{lp}} \right),$$

где $|\bar{r}_0| = \sqrt{(e_x - s_x)^2 + (e_y - s_y)^2 + (e_z - s_z)^2}$.

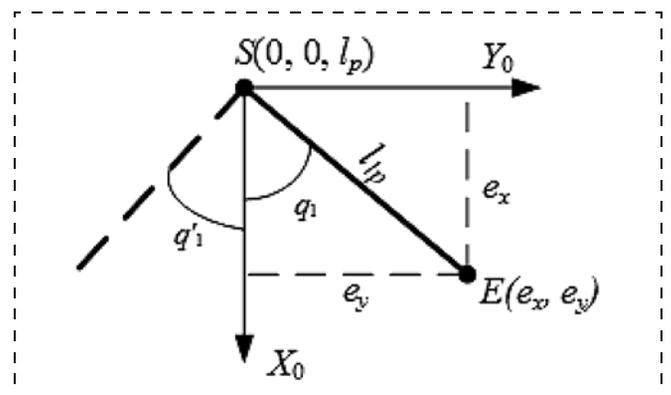


Рис. 4. Движение плечевого сустава руки оператора в продольной плоскости тела

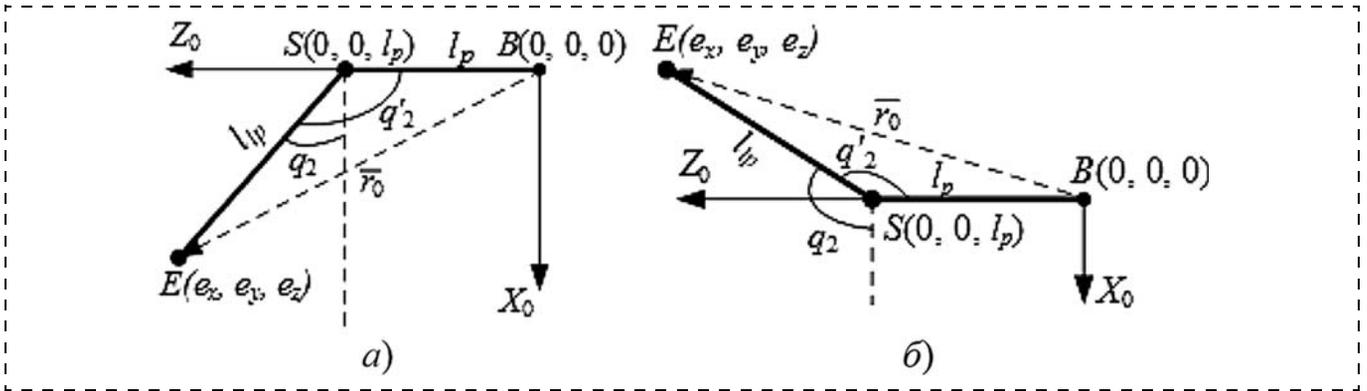


Рис. 5. Движение плечевого сустава руки оператора в поперечной плоскости тела

Если $e_x \geq 0$, тогда обобщенную координату q_2 можно найти как

$$q_2 = q_2' - \frac{\pi}{2};$$

если $e_x < 0$,

$$q_2 = 2\pi - \frac{\pi}{2} - q_2'.$$

3. *Определение обобщенной координаты q_4 .* Координата q_4 отвечает за вращение предплечья относительно плечевого сустава (рис. 6). Для определения обобщенного угла q_4 по заданным значениям положения и ориентации конечной точки воспользуемся теоремой косинусов:

$$q_4 = \pi - \arccos\left(\frac{l_{lp}^2 + l_{lz}^2 - |\bar{r}_1|^2}{2l_{lp}l_{lz}}\right),$$

где $|\bar{r}_1| = \sqrt{(w_x - s_x)^2 + (w_y - s_y)^2 + (w_z - s_z)^2}$.

4. *Определение обобщенной координаты q_3 .* Координата q_3 отвечает за вращение осей сустава локтя

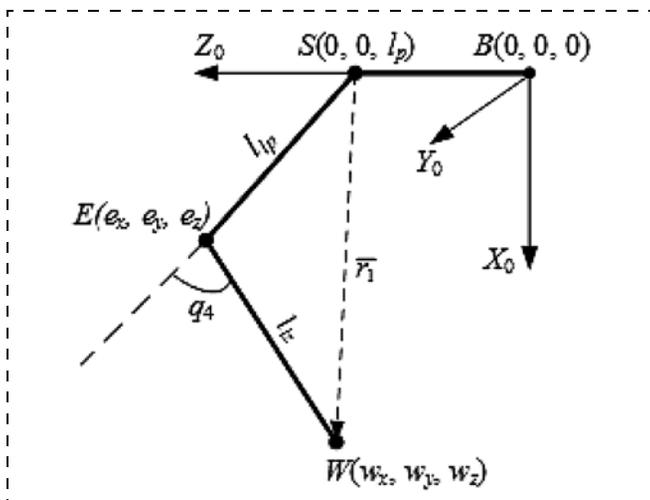


Рис. 6. Вращение предплечья относительно плечевого сустава

относительно продольной оси плеча. Определив координаты локтевого сустава E , координаты ортов системы, связанной с локтем, заданных в базовой системе координат, можно найти согласно следующим выражениям:

$$\bar{n}e = \frac{\overline{BE}}{|\overline{BE}|};$$

$$\bar{a}e = \frac{\overline{ES} \times \overline{WS}}{|\overline{ES} \times \overline{WS}|};$$

$$\bar{o}e = \frac{\bar{a}e \times \bar{n}e}{|\bar{a}e \times \bar{n}e|}.$$

Матрица, определяющая положение и ориентацию системы координаты локтевого сустава относительно системы координат, связанной с плечевым суставом, имеет вид

$$T_0^3 = A_0^0 A_0^1 A_1^2 A_2^3 = \begin{bmatrix} S_1 S_3 + C_1 C_2 C_3 & C_1 S_2 & C_3 S_1 - C_1 C_2 S_3 & -C_1 S_2 l_{lp} \\ S_1 S_3 + C_1 C_2 C_3 & S_1 S_2 & -C_1 C_3 - C_2 S_1 S_3 & -S_1 S_2 l_{lp} \\ -C_3 S_2 & C_2 & S_2 S_3 & -C_2 l_{lp} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $S_i = \sin q_i$, $C_i = \cos q_i$, или

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} ne_x & oe_x & ae_x & e_x \\ ne_y & oe_y & ae_y & e_y \\ ne_z & oe_z & ae_z & e_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Используя равенство элементов [3, 1] и [3, 3] матрицы (1) соответствующим элементам матрицы (2), вычислим значение обобщенной координаты q_3 :

$$q_3 = \arctg\left(\frac{ae_z}{-ne_z}\right).$$

5. Определение обобщенных координат q_5, q_6, q_7 . Матрица, задающая положение и ориентацию кисти руки оператора в целевой позиции, имеет вид

$$T_0^7 = A_0^0 A_1^1 A_2^2 A_3^3 A_4^4 A_5^5 A_6^6 A_7^7,$$

$$T_0^7 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & h_x \\ n_y & o_y & a_y & h_y \\ n_z & o_z & a_z & h_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $\bar{n}(n_x, n_y, n_z)$, $\bar{o}(o_x, o_y, o_z)$, $\bar{a}(a_x, a_y, a_z)$ — орты системы координат, связанной с запястьем, заданные относительно базовой системы координат; h_x, h_y, h_z — координаты центра кисти, определенные в базовой системе координат.

Определенные ранее значения обобщенных координат q_1, q_2, q_3, q_4 позволяют найти выражение

$$(A_0^4)^{-1} \cdot T_0^7 = A_4^5 A_5^6 A_6^7.$$

Пусть

$$(A_0^4)^{-1} \cdot T_0^7 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Найдем произведение

$$L = A_4^5 A_5^6 A_6^7 = \begin{bmatrix} S_5 S_7 + C_5 C_6 C_7 & C_7 S_5 - C_5 C_6 S_7 & -C_6 S_6 & S_5 S_7 l_h + C_5 C_6 C_7 l_h \\ S_5 C_6 C_7 - C_5 S_7 & -C_5 S_7 + C_6 S_5 S_7 & -S_5 S_6 & S_5 C_6 C_7 l_h - C_5 S_7 l_h \\ -C_7 S_6 & S_6 S_7 & -C_6 & l_z - C_7 S_6 l_h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Из равенства элементов [3, 3] матрицы (3) соответствующему элементу матрицы (4) получим

$$q_6 = \arccos(-a_{33}). \quad (5)$$

Из равенства элементов [1, 3] и [2, 3] матрицы (3) соответствующим элементам матрицы (4) получим

$$q_5 = \arctg\left(\frac{-a_{23}/S_6}{-a_{13}/S_6}\right). \quad (6)$$

Из равенства элементов [3, 1] и [3, 2] матрицы (3) соответствующим элементам матрицы (4) найдем

$$q_7 = \arctg\left(\frac{a_{32}/S_6}{-a_{31}/S_6}\right). \quad (7)$$

Выражения (5)—(7) могут использоваться для определения численных значений обобщенных координат q_5, q_6, q_7 , если $S_6 \neq 0$, т.е. $q_6 \neq \pi + \pi n$. В случае равенства $S_6 = 0$, $C_6 = 1$ матрица (4) преобразуется к виду

$$L = A_4^5 A_5^6 A_6^7 = \begin{bmatrix} \cos(q_5 - q_7) & \sin(q_5 - q_7) & 0 & S_5 S_7 l_h + C_5 C_7 l_h \\ \sin(q_5 - q_7) & -\cos(q_5 - q_7) & 0 & S_5 C_7 l_h - C_5 S_7 l_h \\ 0 & 0 & -1 & l_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В данной ситуации возможно лишь поддержание постоянной суммы обобщенных координат q_5 и q_7 , при их произвольном значении. Из равенства элементов [1, 1] и [2, 1] матрицы (3) соответствующим элементам матрицы (8) найдем

$$q_5 + q_7 = \arctg\left(\frac{-a_{21}}{-a_{11}}\right).$$

5. Результаты исследования

Для проверки работоспособности предложенного метода было проведено исследование точности подведения руки оператора к заданной целевой позиции.

Результаты исследования приведены в таблице. В качестве базовых были выбраны несколько позиций, расположенных в оперативном пространстве, изображенные на рис. 7. Целевые позиции формализованы в виде матриц:

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & h_x \\ n_y & o_y & a_y & h_y \\ n_z & o_z & a_z & h_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

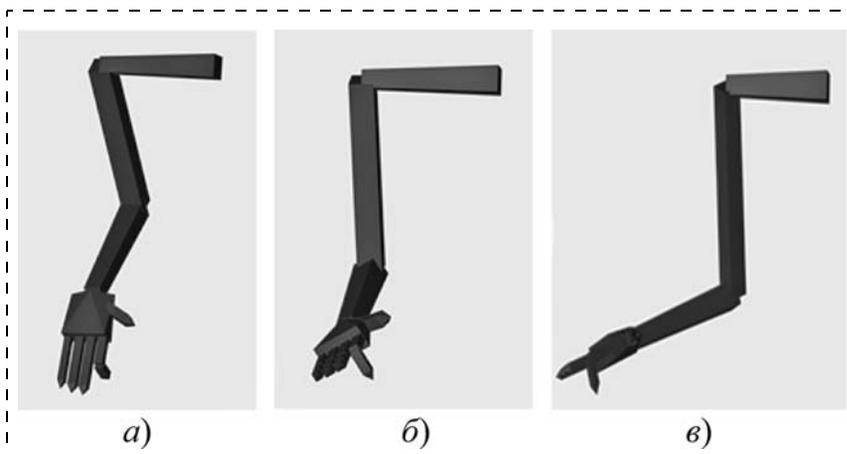


Рис. 7. Моделирование движения руки в MatLab

Исследование точности подведения руки оператора к целевой точке

Матрица положения, заданная в системе координат руки			
Целевая позиция 1	$T = \begin{bmatrix} 0,5 & -0,866 & 0 & 363,3 \\ 0,866 & 0,5 & 0 & 345 \\ 0 & 0 & 1 & 220 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		
Целевая позиция 2	$T = \begin{bmatrix} -0,2588 & -0,8365 & 0,483 & 216,8 \\ 0,9659 & -0,2241 & 0,1294 & 427,3 \\ 0 & 0,5 & 0,886 & 220 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		
Целевая позиция 3	$T = \begin{bmatrix} -0,183 & -0,745 & 0,6415 & 243,8 \\ 0,683 & -0,5657 & -0,4621 & 326,4 \\ 0,7071 & 0,3536 & 0,6124 & 472,2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		
Ошибки в положении руки оператора			
	Целевая позиция 1	Целевая позиция 2	Целевая позиция 3
Δx , мм	0	0,16	1,55
Δy , мм	0	-0,09	-0,9
Δz , мм	$-1,18 \cdot 10^{-13}$	0,035	1,7
Ошибки в ориентации руки оператора			
Вектор нормали \vec{n}			
Δn_x	0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	0,17
Δn_y	$1,1 \cdot 10^{-16}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	-0,1
Δn_z	$-1,25 \cdot 10^{-16}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	0,21
Вектор ориентации \vec{o}			
Δo_x	$-1,1 \cdot 10^{-16}$	$1,1 \cdot 10^{-16}$	$1,1 \cdot 10^{-16}$
Δo_y	0	$-0,3 \cdot 10^{-16}$	$-1,1 \cdot 10^{-16}$
Δo_z	$2,1 \cdot 10^{-16}$	$-1,6 \cdot 10^{-16}$	$1,1 \cdot 10^{-16}$
Вектор подхода \vec{a}			
Δa_x	$2,5 \cdot 10^{-16}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,07
Δa_y	$2,5 \cdot 10^{-16}$	$-4,0 \cdot 10^{-4}$	-0,21
Δa_z	0	0	-0,17

где n — вектор нормали, лежит в плоскости движения пальцев схвата и указывает направление движения пальцев; o — вектор ориентации, касательный вектор, лежит в плоскости движения пальцев схвата, указывает направление движения пальцев во время их отведения и приведения; a — вектор подхода, направлен по нормали к ладони; p — вектор положения, направлен из начала базовой системы координат к началу системы координат кисти.

В ходе исследования выявлено следующее:

- максимальная ошибка в положении руки составляет 1,55 мм;
- максимальное несоответствие заданной ориентации — 0,17.

Заключение

Точность полученных результатов соответствует заданным требованиям, а несомненные преимущества рассматриваемого метода (малые вычислительные и временные затраты, простота реализации, визуально естественная поза, получаемая в результате решения, а также возможность работы с несколькими конечными узлами) делают его наиболее целесообразным для применения при решении обратной задачи кинематики.

Список литературы

1. **Кобринский А. А., Кобринский А. Е.** Манипуляционные системы роботов: основы устройства, элементы теории. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 344 с.
2. **Ситалов Д. С.** Моделирование перемещения аватара в пространстве и его взаимодействия с объектами виртуальной среды: Автореф. дис. канд. техн. наук. Новочеркасск, 2012. 19 с.
3. **Методы биомехатроники тренажера руки человека / А. К. Платонов и др. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2012. № 82. 40 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-82> (дата обращения 10.03.2016).**
4. **Пол Р.** Управление траекторией руки с помощью вычислительной машины // Интегральные роботы. М.: Мир, 1973. С. 326—338.
5. **Накао Э.** Введение в робототехнику. М.: Мир, 1988. 334 с. ISBN 5-03-000396-7.
6. **Pechev A. N.** Inverse kinematics without matrix inversion // Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (Pasadena, CA, USA, May 19—23, 2008). Pasadena, 2008. P. 2005—2012.
7. **Aristidou Andreas, Lasenby Joan.** Inverse Kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver: Technical Report. Cambridge University, 2009. 74 p.
8. **Castellet A., Thomas F.** Using interval methods for solving inverse kinematic problems // Computational Methods in Mechanisms: NATO Advanced Study Institute. 1997. Vol. 2. P. 135—144.
9. **Wang Li-Chun Tommy, Chen Chih Cheng.** A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1991. Vol. 7 (4). P. 489—499.
10. **Müller-Cajar R., Mukundan R.** Triangulation: A new algorithm for inverse kinematics // Proceedings of the Image and Vision Computing (Hamilton, New Zealand, December 2007). New Zealand, 2007. pp. 181—186.
11. **Brown Joel, Latombe Jean-Claude, Montgomery Kevin.** Real-time knot-tying simulation // The Visual Computer: International J. of Computer Graphics. 2004. Vol. 20 (2). P. 165—179.
12. **Aristidou Andreas, Lasenby Joan.** FABRIK: a fast, iterative solver for the inverse kinematics problem // Graphical Models. 2011. Vol. 73. P. 243—260.

Overcoming Redundancy in Solution of the Inverse Kinematics Problem for a Vehicle Operator's Hand

A. A. Kobzev, kobzev42@mail.ru✉, A. V. Lekareva, tasya671@rambler.ru,
Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs (87, Gorky St., Vladimir, 600000, Russia)

Corresponding author: **Kobzev Aleksandr A.**, D. Sc., Professor,
Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs,
Vladimir, 600000, Russian Federation, e-mail: kobzev42@mail.ru

Received on April 07, 2016

Accepted on April 22, 2016

An operator's hand is a spatial mechanism, the configuration of which defines situation and orientation of a robot's hand in space. The biomechanical model of a hand represents a kinematic chain consisting of 18 links with 18 hinges. This design realizes 27 degrees of freedom for the links. Modeling the movements of an operator's hand to a target point is similar to the solution of the feedback problem of positioning in robotics. For complex kinematic structures with a big number of degrees of mobility a solution to this problem involves certain difficulties. At the same time, one of the main problems is the problem of an elbow joint position definition during setting of the final configuration of a person's hand in a target position. This problem can be reduced to the optimization problem with application of a criterion based on the principle of the "lower elbow" described by E. Nakano. Further application of this solution is quite difficult, if it is necessary to model the movement of the higher limb of the operator as a whole, including fingers. Therefore, we have to look for a method, which would allow us to expand the solution, if necessary. At the same time, the method should be simple, reliable and requiring little time and computational complexity. The analysis of the known solutions of the feedback problem of kinematics demonstrated a definite advantage of application of the Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics (FABRIK) method. This method excludes the bulkiness and complexity connected with the use of matrices of rotation by direct definition of the situation on a straight line. After definition of new positions of the kinematic chain nodes it is possible without resorting to considerable efforts to calculate the vector of the generalized coordinates. Research of the accuracy of guiding of the operator's hand to the set target position was made in a SimMechanics package of MatLab for checking of the operability of the proposed method. As basic it chose several positions located in the operational space. Movement control of a hand was exercised by the controller, basing his work on FABRIK method. During research the following facts were revealed: the maximum error in position of a hand was 1,55 mm; the maximum size of discrepancy to the set orientation was 0,17. Accuracy of the received results confirmed the set requirements and the undoubted advantages of the considered method (little computing and time expenditure, simplicity of realization, visually natural pose received due to the solution and also a possibility of work with several final nodes) make it most expedient for application as the solution to the feedback problem of kinematics.

Keywords: operator, biomechanical model, feedback problem of kinematics, kinematic redundancy, method of direct and return following, vector of the generalized coordinates, target position

For citation:

Kobzev A. A., Lekareva A. V. Overcoming Redundancy in Solution of the Inverse Kinematics Problem for a Vehicle Operator's Hand, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 41–48.

DOI: 10.17587/mau.18.41-48

References

1. **Kobrinskij A. A., Kobrinskij A. E.** *Manipuljacionnye sistemy robotov: osnovy ustrojstva, jelementy teorii* (Manipulation systems of robots: the basics of device, elements of the theory), Moscow, Nauka, 1985, 344 p. (in Russian).
2. **Sitalov D. S.** *Modelirovanie peremeshhenija avatara v prostranstve i ego vzaimodejstvija s obektami virtual'noj sredy: Avtoreferat dissertacii kandidata tehniceskix nauk* (Modeling the movement of an avatar in space and its interaction with the virtual environment: abstract of thesis of candidate of technical Sciences), Novocherkassk, 2012, 19 p. (in Russian).
3. **Platonov A. K.** *Metody biomehatroniki trenazhjora ruki cheloveka* (Methods of biomechatronic simulator of a human hand), Preprint IPM im. M. V. Keldysha. 2012, no 82, 40 p. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-82> (in Russian).
4. **Pol R.** *Upravlenie traektoriej ruki s pomoshh'ju vychislitel'noj mashiny* (Path control arms with the help of computers), *Integral'nye Roboty*, Moscow, Mir, 1973, pp. 326–338 (in Russian).
5. **Nakano Je.** *Vvedenie v robototekniku* (Introduction to robotics), Moscow, Mir, 1988, 334 p. (in Russian).
6. **Pechev A. N.** Inverse kinematics without matrix inversion, *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, May 19–23, 2008, pp. 2005–2012.
7. **Aristidou Andreas, Lasenby Joan.** Inverse Kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver: Technical Report, Cambridge University, 2009, 74 p.
8. **Castellet A., Thomas F.** Using interval methods for solving inverse kinematic problems, *Computational Methods in Mechanisms*: NATO Advanced Study Institute, 1997, vol. 2, pp. 135–144.
9. **Wang Li-Chun Tommy, Chen Chih Cheng.** A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1991, vol. 7 (4), pp. 489–499.
10. **Müller-Cajar R., Mukundan R.** Triangulation: A new algorithm for inverse kinematics, *Proceedings of the Image and Vision Computing*, Hamilton, New Zealand, December, 2007, pp. 181–186.
11. **Brown Joel, Latombe Jean-Claude, Montgomery Kevin.** Real-time knot-tying simulation, *The Visual Computer: International J. of Computer Graphics*, 2004, vol. 20 (2), pp. 165–179.
12. **Aristidou Andreas, Lasenby Joan.** FABRIK: a fast, iterative solver for the inverse kinematics problem, *Graphical Models*, 2011, vol. 73, pp. 243–260.

И. В. Брякин, д-р техн. наук, зав. лаб., bivas2006@yandex.ru,

Институт автоматизации и информационных технологий НАН Кыргызской Республики, г. Бишкек

Магнитометр с тестовым алгоритмом функционирования

Для решения задач в области измерений геомагнитных полей при проведении геофизических и космических исследований предлагаются новый способ измерения вектора напряженности геомагнитного поля и вариант устройства для его реализации. Представлены тестовый алгоритм измерения и вариант структурной блок-схемы магнитометра. Рассмотрены особенности измерительных процедур и режимов функционирования магнитометра.

Ключевые слова: геомагнитное поле, магнитометр, феррозондовый датчик, измерительная процедура, синхронный детектор, синфазная и квадратурная составляющие, электрический сигнал, тестовый алгоритм

Введение

В настоящее время существует целый ряд конкретных практических задач прикладной геофизики, решение которых требует надежного и точного измерения характеристик геомагнитного поля [1, 2].

Известно множество способов исследования геомагнитных полей, большинство из которых основано на тесной связи между магнитными и электрическими явлениями [3, 4]. При реализации этих способов наибольшее распространение нашли феррозондовые магнитометры, которые осуществляют измерение физических величин при использовании в качестве рабочей среды магнитного поля и характеризуются не только достаточно высокой чувствительностью, но и возможностью непосредственного измерения составляющих вектора магнитного поля, обеспечивая тем самым получение полной информации о структуре поля и его источниках [5].

Широкое распространение нашел способ для измерения трех взаимно перпендикулярных составляющих T_1 , T_2 и T_3 вектора напряженности \mathbf{T} геомагнитного поля трехкомпонентным магнитометром, содержащим три взаимно ортогонально ориентированных феррозондовых датчика (ФД) [6]. Каждая компонента вектора напряженности геомагнитного поля измеряется соответствующим ФД данного магнитометра. Модуль вектора напряженности магнитного поля определяется по результатам измерений трех компонент данного вектора путем вычисления следующей зависимости:

$$|\mathbf{T}| = \sqrt{\left(\frac{U_1}{K_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{K_2}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{K_3}\right)^2},$$

где U_1 , U_2 , U_3 — результаты измерений электрических сигналов на выходах трех измерительных каналов (ИК) соответствующих ФД; K_1 , K_2 , K_3 — суммарные коэффициенты преобразования соответствующих трех последовательно соединенных между собой ФД и ИК; $U_1/K_1 = T_1$, $U_2/K_2 = T_2$, $U_3/K_3 = T_3$ — составляющие вектора напряженности магнитного поля \mathbf{T} .

Недостатком данного способа является необходимость использования трех ФД, объективно имеющих неидентичные коэффициенты преобразования. Индивидуальные конструктивные и технологические особенности ФД определяют и специфичность функционирования каждого из них. В этом случае наблюдается временной дрейф, а при работе магнитометра в диапазоне температур имеется существенная погрешность из-за температурного дрейфа нулевого сигнала. Наличие трех измерительных каналов в магнитометре усугубляет все перечисленные выше факторы и значительно снижает точность реализуемого способа измерения.

Подобные недостатки присущи и другим методам измерения геомагнитных полей, а соответственно, и устройствам их реализации [7, 8]. Поэтому исследования, направленные на решение проблем дальнейшего совершенствования магнитометров в плане повышения их надежности и долговечности, устойчивости к помехам, снижения веса и уменьшения габаритных размеров, по-прежнему остаются актуальными.

На основе проведенных исследований, базирующихся на анализе и обобщении научных результатов в области алгоритмических методов повышения точности измерения физических величин, предлагается новый способ измерения вектора напряженности геомагнитного поля и вариант построения устройства его реализации.

Обоснование принципа построения магнитометра

Рассмотрим возможность применения в качестве трехкомпонентной системы измерения параметров геомагнитного поля магнитометр с одним ФД [9].

Пусть $\{X, Y, Z\}$ — прямоугольная система координат, связанная с неподвижной платформой I , на которой расположен однокомпонентный магнитометр 2 (рис. 1). Координатные оси системы ориентации платформы $\{X, Y, Z\}$ совмещены с соответствующими координатными осями географической системы $\{X_G, Y_G, Z_G\}$, т.е. ось X ориентирована на север, Y — на восток, Z — направлена вертикально вниз по отвесу.

ФД магнитометра имеет возможность равномерного вращения с угловой скоростью ω относи-

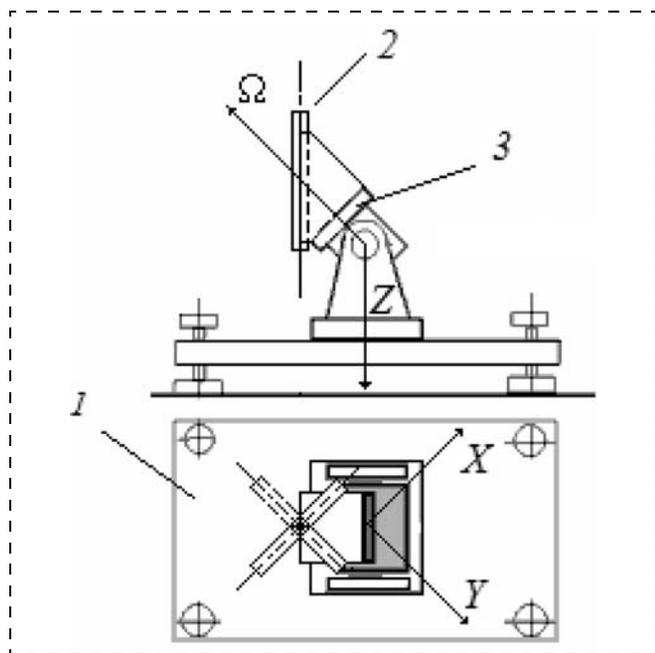


Рис. 1. Общий вид магнитометра на базе неподвижной платформы

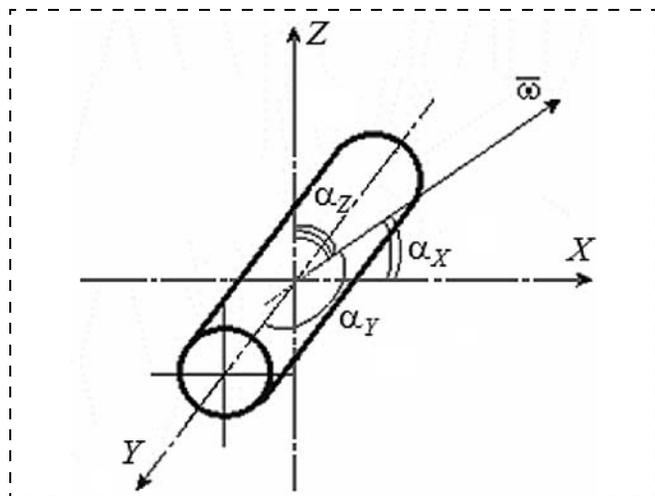


Рис. 2. Пространственное расположение ФД относительно оси вращения

тельно неподвижной оси Ω с угловыми координатами $\alpha_X = \alpha_Y = \alpha_Z = \alpha = \text{arctg}(\sqrt{2})$, а его ось чувствительности (продольная ось) расположена к оси вращения Ω под углом α (рис. 2). Вращение ФД осуществляется посредством шагового двигателя 3.

Если рассматривать координатную ось X как образующую поверхности конуса, то координатные оси Y и Z в силу указанных выше условий также будут принадлежать этой поверхности. В этом случае координатные оси Y и Z можно интерпретировать как результаты пространственного перемещения координаты X при вращении относительно неподвижной оси Ω соответственно на 120° и 240° . Выделим дополнительно на поверхности рассматриваемого конуса образующую Θ , смещенную относительно координатной оси X на угол в 270° (рис. 3).

На ФД магнитометра воздействует измеряемое геомагнитное поле \mathbf{T} (естественное) и направленное вдоль оси вращения Ω вспомогательное переменное магнитное поле \mathbf{T}_0 (искусственное) с угловой частотой ω_0 , равной по величине угловой скорости ФД ω и синхронизированной с ней (рис. 3).

Полагаем, что во время проведения измерений вектор измеряемого магнитного поля \mathbf{T} постоянен и неподвижен в пространстве и составляет угол β с осью Ω (рис. 4), а параметры вспомогательного переменного магнитного поля \mathbf{T}_0 являются изначально заданными и известными.

Угол β между векторами $\Omega\{\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z\}$ и $\mathbf{T}\{T_X, T_Y, T_Z\}$ определяется согласно следующему выражению [10]:

$$\cos\beta = \frac{\Omega_X T_X + \Omega_Y T_Y + \Omega_Z T_Z}{\sqrt{\Omega_X^2 + \Omega_Y^2 + \Omega_Z^2} \sqrt{T_X^2 + T_Y^2 + T_Z^2}} \quad (1)$$

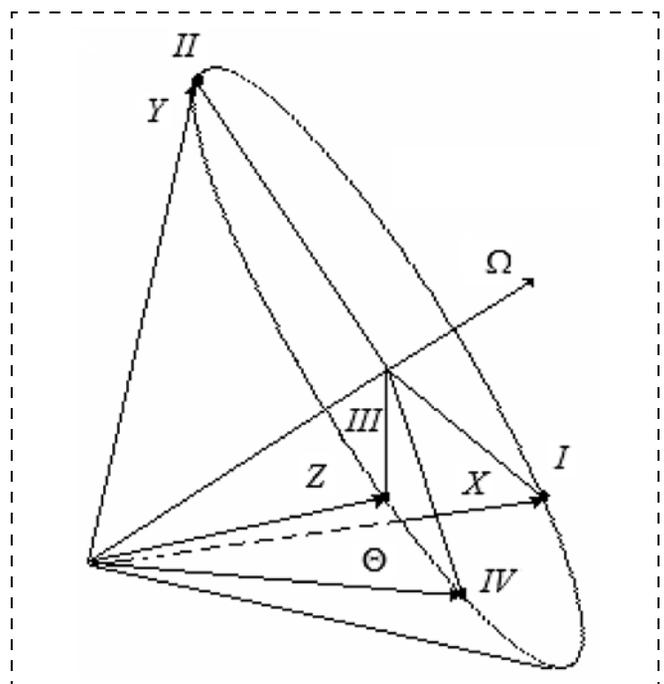


Рис. 3. Пространственное расположение координатных осей

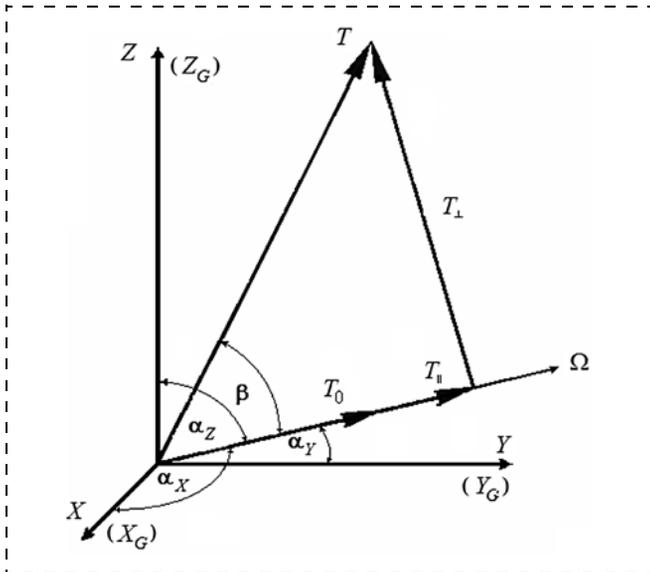


Рис. 4. Пространственное расположение магнитных полей T и T_0

В силу того, что $\alpha_X = \alpha_Y = \alpha_Z = \alpha = \arctg(\sqrt{2})$ можем записать:

$$\Omega_X = \Omega_Y = \Omega_Z = \Omega \cos \alpha.$$

Тогда выражение (1) примет вид

$$\cos \beta = \frac{(T_X + T_Y + T_Z)}{\sqrt{3(T_X^2 + T_Y^2 + T_Z^2)}}.$$

Учитывая, что

$$\cos \varphi_X = \frac{T_X}{\sqrt{(T_X^2 + T_Y^2 + T_Z^2)}},$$

$$\cos \varphi_Y = \frac{T_Y}{\sqrt{(T_X^2 + T_Y^2 + T_Z^2)}},$$

$$\cos \varphi_Z = \frac{T_Z}{\sqrt{(T_X^2 + T_Y^2 + T_Z^2)}},$$

выражение (1) трансформируется к виду

$$\cos \beta = (\cos \varphi_X + \cos \varphi_Y + \cos \varphi_Z) / \sqrt{3}. \quad (2)$$

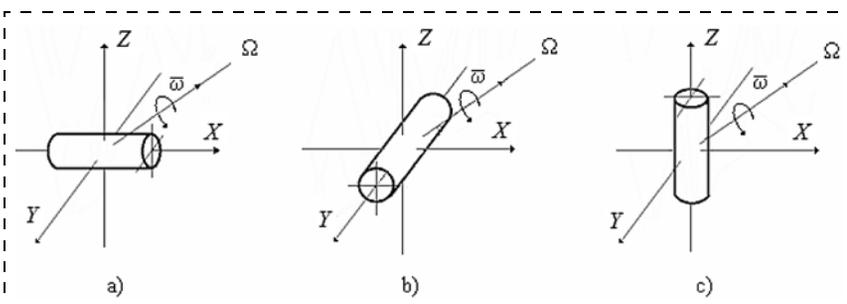


Рис. 5. Три основных рабочих пространственных положения ФД

Регулярно вращающийся вокруг оси Ω ФД непрерывно перемещается в пространстве таким образом, что в результате его магнитная ось периодически с частотой ω совпадает с соответствующими географическими координатными осями (рис. 5).

Тогда для каждой компоненты суммарного магнитного поля, направленной вдоль осей X, Y, Z и Θ , в общем случае соответствующие изменения можем записать в виде исходной системы уравнений:

$$\begin{cases} T_X = T \cos \beta \cos \alpha_X + T_0 \cos \alpha_X \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha_X \cos(\omega t + \varphi_X); \\ T_Y = T \cos \beta \cos \alpha_Y + T_0 \cos \alpha_Y \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha_Y \cos(\omega t + \varphi_Y); \\ T_Z = T \cos \beta \cos \alpha_Z + T_0 \cos \alpha_Z \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha_Z \cos(\omega t + \varphi_Z); \\ T_\Theta = T \cos \beta \cos \alpha_\Theta + T_0 \cos \alpha_\Theta \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha_\Theta \cos(\omega t + \varphi_\Theta), \end{cases}$$

где $\varphi_X, \varphi_Y, \varphi_Z$ и φ_Θ — начальные фазы, определяющиеся начальным положением вектора T в системе координатных осей X, Y, Z и Θ ; T — модуль вектора измеряемого геомагнитного поля T .

С учетом ранее сделанных замечаний исходную систему уравнений представим следующим образом:

$$\begin{cases} T_X = T \cos \beta \cos \alpha + T_0 \cos \alpha \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_X); \\ T_Y = T \cos \beta \cos \alpha + T_0 \cos \alpha \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_Y); \\ T_Z = T \cos \beta \cos \alpha + T_0 \cos \alpha \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_Z); \\ T_\Theta = T \cos \beta \cos \alpha + T_0 \cos \alpha \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_\Theta). \end{cases} \quad (3)$$

В рассматриваемом случае вектор измеряемого магнитного поля T можно разложить на две компоненты: продольную $T_{||}$ (вдоль си вращения Ω) и поперечную T_{\perp} (под прямым углом к оси вращения Ω), которые образуют дополнительный ортонормированный базис (ДОБ). Измеренная величина $T_{||}$ зависит от смещения нуля компонент магнитометра и магнитного поля объекта. Поперечная компонента T_{\perp} не зависит от этих величин и измеряется абсолютно, а вспомогательное переменное магнитное поле T_0 фактически является продольной компонентой $T_{0||}$ в рассматриваемом ДОБ.

Обозначим: $T_{||} = T \cos \beta$ — составляющая вектора измеряемого магнитного поля T , направленная вдоль оси Ω ; $T_{\perp} = T \sin \beta$ — составляющая вектора измеряемого магнитного поля T , перпендикулярная к оси Ω .

Каждая компонента суммарного магнитного поля, направленная вдоль осей X, Y и Z , имеет синусоидальную составляющую с амплитудой, равной

проекция T_{\perp} на соответствующую ось, постоянную составляющую, равную проекции T_{\parallel} на ту же ось, и косинусоидальную составляющую с амплитудой, равной проекции $T_{0\parallel}$ на ту же ось. В этом случае система уравнений (3) преобразуется к виду

$$\begin{cases} T_{\Sigma X} = T_{\parallel} \cos \alpha + T_{0\parallel} \cos \alpha \cos \omega_0 t + T_{\perp} \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_X); \\ T_{\Sigma Y} = T_{\parallel} \cos \alpha + T_{0\parallel} \cos \alpha \cos \omega_0 t + T_{\perp} \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_Y); \\ T_{\Sigma Z} = T_{\parallel} \cos \alpha + T_{0\parallel} \cos \alpha \cos \omega_0 t + T_{\perp} \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_Z); \\ T_{\Sigma \Theta} = T_{\parallel} \cos \alpha + T_{0\parallel} \cos \alpha \cos \omega_0 t + T_{\perp} \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_{\Theta}). \end{cases} \quad (4)$$

Обозначив постоянную составляющую A_{\parallel} , амплитуды переменных косинусоидальной и синусоидальной составляющих — соответственно B_{\parallel} и C_{\perp} , для системы уравнений (4) с учетом того, что $\omega_0 = \omega$, можем записать

$$\begin{cases} T_{\Sigma X} = A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_X); \\ T_{\Sigma Y} = A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_Y); \\ T_{\Sigma Z} = A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_Z); \\ T_{\Sigma \Theta} = A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_{\Theta}). \end{cases} \quad (5)$$

Из ортогональности системы X , Y и Z следует

$$\begin{cases} T^2 \cos^2 \beta = 3A_{\parallel}^2; \\ T^2 \sin^2 \beta = C_{\perp}^2 (\cos^2 \varphi_X + \cos^2 \varphi_Y + \cos^2 \varphi_Z). \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, можно констатировать, что в рассматриваемом случае возможно измерение трех компонент вектора \mathbf{T} и его модуля $|\mathbf{T}| = T$ с помощью одного и того же ФД, осуществляющего регулярное вращение относительно некоторой неподвижной оси Ω .

Теперь перейдем от анализа компонент магнитного поля в рассматриваемой системе координат с вращающимся в пространстве ФД к анализу сигналов в выходной цепи измерительного канала магнитометра.

В общем случае для ФД в зафиксированном в пространственном положении, когда его чувствительная ось совпадает с направлением вектора \mathbf{T} , можно записать следующее уравнение [9]:

$$U(t) = 6\omega^* bsw H_m^2 T \sin 2\omega^* t, \quad (7)$$

где $U(t)$ — выходное напряжение с выхода ФД; H_m и ω^* — соответственно амплитуда и круговая частота возбуждающего ФД поля; b — коэффициент, характеризующий магнитное свойство сердечника; s — площадь поперечного сечения сердечника; w — число витков измерительной катушки; T — модуль вектора измеряемого геомагнитного поля.

Для простоты анализа введем следующие обозначения:

$$q = 6\omega^* bsw H_m^2,$$

где q — коэффициент прямого преобразования ФД.

С учетом возможности углового перемещения ФД уравнение (7) можно трансформировать к следующему виду:

$$U_i(t) = qT_i \sin 2\omega^* t, \quad (8)$$

где T_i — проекция вектора измеряемого геомагнитного поля на одну из возможных координатных осей.

Обобщая уравнения (5) и (8), получаем уравнение вида

$$U_i(t) = q[A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_i)] \sin 2\omega^* t, \quad (9)$$

где φ_i — угловая координата расположения ФД в i -й точке пространства в рассматриваемой системе координат.

Из уравнения (9) видно, что на выходах перемещающегося в пространстве ФД наблюдаются амплитудно-модулированные электрические сигналы с несущим колебанием частотой $2\omega^*$ и с модулирующим колебанием частотой ω .

Для последующей обработки таких сигналов воспользуемся известным способом реализации селективного преобразования с периодической весовой функцией, в основе которого лежит применение синхронных детекторов (СД), т.е. аналоговых перемножителей с интегратором или фильтром нижних частот.

После соответствующего амплитудного детектирования этих сигналов с помощью такого СД на частоте $2\omega^*$ на выходе измерительного канала ФД будет выделяться огибающая несущего сигнала:

$$U_{O_i}(t) = dq[A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_i)], \quad (10)$$

где d — коэффициенты преобразования СД.

Согласно выражению (10) составляем систему уравнений для сигналов, полученных в результате амплитудного детектирования для соответствующих пространственных позиций ФД:

$$\begin{cases} U_{\Sigma X} = Q[(A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t) + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_X)]; \\ U_{\Sigma Y} = Q[(A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t) + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_Y)]; \\ U_{\Sigma Z} = Q[(A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t) + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_Z)]; \\ U_{\Sigma \Theta} = Q[(A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t) + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_{\Theta})], \end{cases} \quad (11)$$

где $Q = dq$.

При ближайшем рассмотрении системы уравнений (11) видно, что электрические сигналы, вырабатываемые ФД пропорционально измеряемым компонентам поля, можно условно разделить на "синфазные" U_C и "квадратурные" U_K составляющие по отношению к фазе вектора угловой скорости вращения ω относительно неподвижной оси Ω , а значит, и по отношению к фазе напряжения возбуждения U_B угловой частоты ω_0 вспомогательно-го переменного магнитного поля \mathbf{T}_0 , т.е. примени-

тельно к: координатным осям X, Y, Z и Θ можем записать:

$$\begin{cases} U_0 = Q[A_{\parallel} + B_{\parallel}\cos 0^\circ] + Q C_{\perp}\cos\varphi_X = U_{0C} + U_{0K}; \\ U_{120} = Q[A_{\parallel} + B_{\parallel}\cos 120^\circ] + Q\cos\varphi_Y = \\ = U_{120C} + U_{120K}; \\ U_{240} = Q[A_{\parallel} + B_{\parallel}\cos 240^\circ] + Q C_{\perp}\cos\varphi_Z = \\ = U_{240C} + U_{240K}; \\ U_{270} = Q[A_{\parallel} + B_{\parallel}\cos 270^\circ] + Q C_{\perp}\cos\varphi_{\Theta} = \\ = U_{270C} + U_{270K}. \end{cases} \quad (12)$$

Поэтому, применяя два дополнительных СД, опорное напряжение первого из которых настроено соответственно "синфазно" (фазовый сдвиг равен 0), а опорное напряжение второго — "квадратурно" (фазовый сдвиг равен $\pi/2$) по отношению к фазе возбуждающего напряжения U_B , можем составить согласно уравнениям (12) следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} U_{0C} = S_1[A_{\parallel} + B_{\parallel}], U_{0K} = S_2 C_{\perp}\cos\varphi_X; \\ U_{120C} = S_1[A_{\parallel} - 0,5B_{\parallel}], U_{120K} = S_2 C_{\perp}\cos\varphi_Y; \\ U_{240C} = S_1[A_{\parallel} - 0,5B_{\parallel}], U_{240K} = S_2 C_{\perp}\cos\varphi_Z; \\ U_{270C} = S_1 A_{\parallel}, U_{270K} = S_2 C_{\perp}\cos\varphi_{\Theta}, \end{cases} \quad (13)$$

где S_1 — коэффициент преобразования первого измерительного канала магнитометра, включающего "синфазный" СД; S_2 — коэффициент преобразования второго измерительного канала магнитометра, включающего "квадратурный" СД; $U_{120}, U_{240}, U_{270}$ — электрические напряжения сигналов на выходе ФД при его вращении в моменты совпадения его продольной оси с соответствующими координатными осями X, Y, Z и Θ ; $U_{0C}, U_{120C}, U_{240C}, U_{270C}$ — электрические напряжения "синфазных" составляющих сигналов на выходе магнитометра при вращении ФД в моменты совпадения продольной оси ФД с соответствующими координатными осями X, Y, Z и Θ ; $U_{0K}, U_{120K}, U_{240K}, U_{270K}$ — электрические напряжения "квадратурных" составляющих на выходе магнитометра при вращении ФД в моменты совпадения продольной оси ФД с соответствующими координатными осями X, Y, Z и Θ .

Из уравнений (13) следует, что после синхронного детектирования электрических сигналов на выходе магнитометра в моменты прохождения ФД через пространственные позиции, расположенные на координатах X, Y, Z и Θ , будут выделяться соответствующие огибающие несущего сигнала.

Считая $S_1 = S_2 = S$ и исходя из того, что

$$\begin{cases} U_{0C} = S A_{\parallel} + S B_{\parallel}, \\ U_{270C} = S A_{\parallel}, \end{cases}$$

определим коэффициент преобразования измерительного канала магнитометра:

$$S = (U_{0C} - U_{270C})/B_{\parallel} = (U_{0C} - U_{270C})/[|T_0|\cos\alpha].$$

Для упрощения математических преобразований введем следующие обозначения:

$$a = U_{0K}/U_{270C}; \quad b = U_{120K}/U_{270C}; \quad c = U_{240K}/U_{270C}.$$

Тогда с учетом (13) можем записать

$$a = \operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta\cos\varphi_X; \quad b = \operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta\cos\varphi_Y; \quad c = \operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta\cos\varphi_Z. \quad (14)$$

Подставляя выражения (14) в уравнение (2), получим

$$\cos\beta = (a + b + c)/(\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta\sqrt{3}). \quad (15)$$

Из уравнения (15) находим:

$$\sin\beta = (a + b + c)\operatorname{ctg}\alpha/\sqrt{3}$$

или

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \frac{(a + b + c)^2}{3}\operatorname{ctg}^2\alpha}. \quad (16)$$

Из выражения (16) определим:

$$\beta = \arccos\left[\sqrt{1 - \frac{(a + b + c)^2}{3}\operatorname{ctg}^2\alpha}\right]. \quad (17)$$

Используя свойства тригонометрических преобразований, можем записать

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\sin\beta}{\cos\beta} = \frac{1}{\sqrt{\frac{3\operatorname{tg}^2\alpha}{(a + b + c)^2} - 1}}.$$

Исходя из того, что

$$\begin{aligned} \cos\varphi_X &= a/(\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta); \quad \cos\varphi_Y = b/(\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta); \\ \cos\varphi_Z &= c/(\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta), \end{aligned}$$

подставив значение $\operatorname{tg}\beta$, определяем угловые координаты вектора \mathbf{T} :

$$\begin{cases} \varphi_X = \\ = \arccos\left[U_{0K}\sqrt{\frac{3}{(U_{0K} + U_{120K} + U_{240K})^2} - \frac{1}{U_{270C}^2\operatorname{ctg}^2\alpha}}\right], \\ \varphi_Y = \\ = \arccos\left[U_{120K}\sqrt{\frac{3}{(U_{0K} + U_{120K} + U_{240K})^2} - \frac{1}{U_{270C}^2\operatorname{ctg}^2\alpha}}\right], \\ \varphi_Z = \\ = \arccos\left[U_{240K}\sqrt{\frac{3}{(U_{0K} + U_{120K} + U_{240K})^2} - \frac{1}{U_{270C}^2\operatorname{ctg}^2\alpha}}\right]. \end{cases} \quad (18)$$

Из систем уравнений (2) и (6) после несложных математических преобразований определяем величину модуля полного вектора \mathbf{T} напряженности геомагнитного поля:

$$|\mathbf{T}| = \frac{\sqrt{3U_C^2 + U_{0K}^2 + U_{120K}^2 + U_{240K}^2}}{S},$$

где $U_C = U_{0C} = U_{120C} = U_{240C}$.

Окончательно можем записать:

$$|\mathbf{T}| = \frac{\sqrt{3U_{270C}^2 + U_{0K}^2 + U_{120K}^2 + U_{240K}^2}}{(U_{0C} - U_{270C})} T_0 \cos\alpha. \quad (19)$$

Полученные аналитические выражения (18) и (19) фактически являются тестовыми измерительными алгоритмами, посредством которых определяют значения параметров исследуемого геомагнитного поля.

Из анализа измерительных алгоритмов (18) и (19) видно, что необходимые параметры магнитного поля определяются исходя из результатов четырех измерительных процедур: 1) регистрируются значения величин U_{0C} и U_{0K} ; 2) регистрируется значение величины U_{120K} ; 3) регистрируется значение величины U_{240K} ; 4) регистрируется значение величины U_{270C} . С учетом заданных параметров T_0 и $\cos\alpha$, по результатам измерительных процедур алгоритмически определяются значения основных параметров полного вектора напряженности \mathbf{T} геомагнитного поля, т.е. его модуля $|\mathbf{T}|$, и угловые координаты φ_X , φ_Y и φ_Z . Кроме того, особенности структуры полученных измерительных алгоритмов определения значения основных параметров полного вектора напряженности \mathbf{T} геомагнитного поля обеспечивают свойство инвариантности результатов измерения к изменениям коэффициентов преобразования измерительных каналов магнитометра.

Структурная блок-схема магнитометра

Исходя из полученных измерительных алгоритмов можно предложить вариант магнитометра с тестовым алгоритмом функционирования, структурная схема которого представлена на рис. 6.

Магнитометр состоит из следующих функциональных модулей: 1 — ФД; 2 — вторичный измерительный преобразователь (селективный усилитель); 3 — СД на удвоенную частоту напряжения возбуждения ФД; 4.1 и 4.2 — СД соответственно синфазной и квадратурной составляющих выходного сигнала ФД на частоте вспомогательного переменного магнитного поля; 5.1 и 5.2 — стробируемые АЦП

соответственно для синфазной и квадратурной составляющих выходного сигнала ФД; 6 — генератор для шагового двигателя; 7 — генератор возбуждения для ФД; 8 — блок управления и синхронизации; 9 — кодоуправляемый мультиплексор; 10 — вычислительный блок; 11 — шаговый двигатель; 12 — катушка возбуждения вспомогательного переменного магнитного поля. Выходом магнитометра является информационный выход вычислительного блока 10.

ФД 1 выполнен с возможностью равномерного пространственного перемещения через четыре фиксированных положения, образующих измерительные позиции ФД и совпадающих с осями географической (астрономической) системы координат X_G , Y_G , Z_G и координатной осью Θ . Перемещение ФД с одной измерительной позиции на другую осуществляется поворотным устройством на базе шагового двигателя 11 с фиксированной угловой частотой ω .

С помощью блока 8 фиксируются моменты прохождения компонентным ФД координатных осей X_G , Y_G , Z_G , Θ и осуществляется необходимая синхронизация и управление режимами работы всех основных функциональных узлов магнитометра.

Таким образом, весь измерительный процесс реализуется одним ФД магнитометра путем его равномерного вращения с угловой скоростью ω под углом α вокруг оси Ω с угловыми координатами $\alpha_X = \alpha_Y = \alpha_Z = \alpha = \arctg(\sqrt{2})$, а сами векторные измерения осуществляются при одновременном воздействии измеряемого магнитного поля \mathbf{T} и направленного вдоль оси вращения Ω вспомогательного переменного магнитного поля \mathbf{T}_0 с угловой частотой $\omega_0 = \omega$, синхронизированной соответствующим образом блоком 8.

Измерительный процесс, реализуемый рассматриваемым магнитометром, состоит из четырех измерительных тактов, каждый из которых с определенной периодичностью реализуется соответствующим образом на одной из четырех измерительных позиций (I, II, III и IV).

Первому измерительному такту соответствует расположение ФД на первой измерительной позиции I, для которой характерно совпадение продольной оси ФД с географической координатной осью X_G , и на которой фиксируют значения синфазной U_{0C} и квадратурной U_{0K} составляющих суммарного сигнала U_0 .

Второму измерительному такту соответствует расположение ФД на второй измерительной позиции II, которая, в свою очередь, характеризуется совпадением продольной оси ФД с географической координатной осью Y_G , и на которой фиксируют значение квадратурной составляющей U_{120K} суммарного сигнала U_{120} .

Третьему измерительному такту соответствует расположение ФД на

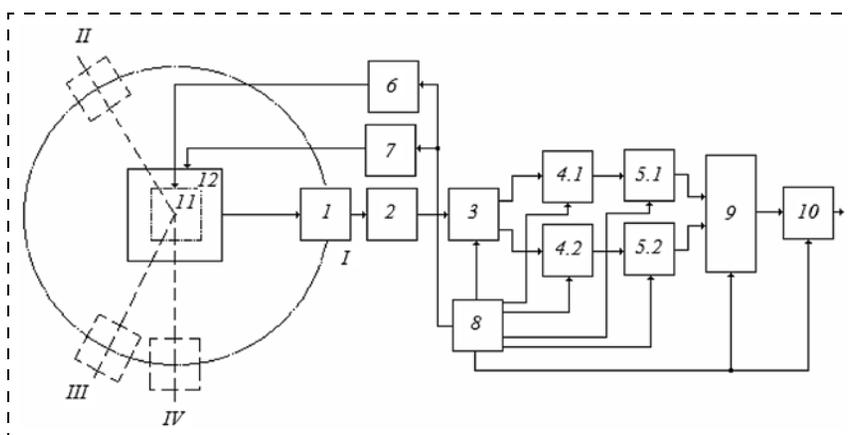


Рис. 6. Блок-схема магнитометра с тестовым алгоритмом функционирования

третьей измерительной позиции *III*, которая характеризуется совпадением продольной оси ФД с географической координатной осью Z_G , и на которой фиксируют значение квадратурной составляющей U_{240K} суммарного сигнала U_{240} .

Четвертому измерительному такту соответствует расположение ФД на четвертой измерительной позиции *IV*, которая характеризуется совпадением продольной оси ФД с координатной осью Θ , и на которой фиксируют значение синфазной составляющей U_{270C} суммарного сигнала U_{270} .

Текущая информация о результатах измерения четырех измерительных тактов последовательно в цифровом виде с выходов АЦП 5.1 и 5.2 через мультиплексор 9 вводится в вычислительный блок 10, который, реализуя алгоритмы (18) и (19), определяет требуемые параметры магнитного поля **T** в виде конкретных числовых значений.

Заключение

Использование дополнительного эффекта модуляции полезных сигналов, который возникает при вращении ФД в остаточном поле и при его подмагничивании тестовым переменным магнитным полем, позволяет минимизировать практически все погрешности измерения компонент поля: ошибки градуировки и непостоянства чувствительности (мультипликативную погрешность); смещение и флуктуацию нуля (аддитивную погрешность) [10].

Рассматриваемый магнитометр предназначен для измерения трех ортогональных компонент слабого магнитного поля, жестко связанных с осями платформы, на которой он установлен. При заранее известной ориентации осей платформы с помощью магнитометра определяется вектор исследуемого поля, если же ориентация осей неизвестна, то данные измерений достаточны для оценки скалярной величины поля. Данный тип магнитометра в сочетании с отдельными видами ФД обладает высокой надежностью, устойчивостью к помехам и незначи-

тельным энергопотреблением, сравнительно малыми массой и габаритными размерами [9].

По существу, данный магнитометр является прецизионным нуль-индикатором, с помощью которого можно довольно точно измерять компоненты геомагнитного поля, проводить работы, связанные с геофизическими исследованиями, с определением магнитной девиации, создаваемой различными подвижными объектами [11]. Обладая приемлемой чувствительностью и высокой точностью преобразования, а также острой диаграммой направленности, магнитометр может быть использован также в следящих системах, обеспечивающих ориентацию тех или иных объектов по геомагнитному полю.

Список литературы

1. Логачев А. А., Захаров В. П. Магниторазведка. Л.: Недра, 1979. 351 с.
2. Гордин В. М. Очерки по истории геомагнитных измерений. М.: ИФЗ РАН, 2004. 162 с.
3. Ляховицкий Ф. М., Хмелевской В. К. Инженерная геофизика. М.: Недра, 1989. 252 с.
4. Lanza R., Meloni A. The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists. Berlin: Springer, 2006. 280 p.
5. Звездинский С. С. Магнитометрические феррозондовые градиентометры для поиска взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. 2009. № 1. С. 16–29.
6. Бугай А. И., Линко Ю. Р., Соборов А. Н. и др. Феррозондовый магнитометр // А. С. № 930176 (СССР) МК G01R 33/02. Оpubл. 23.05.82, Бюл. № 19.
7. Bratland T., Caruso M. J., Schneider R. A., Smith C. H. New Perspective on Magnetic Field Sensing // Sensors. 1998. Vol. 5, N. 12. P. 34–46.
8. Ripka P. Magnetic Sensors and Magnetometers. Norwood, United States: Artech House, 2001. 516 p.
9. Брякин И. В. Электромодуляционный феррозондовый магнитометр // Труды третьей Российской конференции с международным участием "Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения" (УКИ-12). М.: ИПУ РАН, 2012. С. 610–618.
10. Брякин И. В. Магнитометр для систем ориентации объектов по магнитному полю // Труды "Четвертой Международной конференции по проблемам управления" (МКПУ-IV). М.: ИПУ РАН, 2009. С. 1944–1953.
11. Мухаметшин А. М. Подземная векторная магнитометрия в рудничной геологии. Екатеринбург: ИГД УрО АН СССР, 1997. 214 с.

Magnetometer with a Test Algorithm of Functioning

I. V. Bryakin, bivas2006@yandex.ru,

Institute of Automation and Information Technologies

of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic

Corresponding author: **Bryakin Ivan V.**, D. Sc., Senior Researcher, Chief of Laboratory of Information-Measuring Systems, Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, e-mail: bivas2006@yandex.ru

Received on July 01, 2016

Accepted on July 25, 2016

A new method for measuring of the geomagnetic field vector and magnetometer option for its implementation was proposed as a solution to the problems in the sphere of the geomagnetic fields' measurements during geophysical and cosmic investigations. Under consideration is a magnetometer option, which uses one flux-gate sensor, as a basic functional element, oriented on measurement of three orthogonal components of a weak magnetic field, rigidly connected with the platform axes, on which the magnetometer is installed. The vector parameters of the investigated field are defined by means of the magnetometer at the previously known orientation of the platform axes. Application of the additional effect of the useful signals modulation,

which arises during rotation of the flux-gate sensor in the residual field and during its biasing by the test alternating magnetic field, allows us to minimize all the measurement errors of the field components: graduation errors and sensibility variations (multiplicative error); zero shift and fluctuation (additional error). In the work a new test measurement algorithm is substantiated; an option of magnetometer structural block-diagram is considered; peculiarities of the measuring procedures and magnetometer functioning modes are analyzed. The proposed option of the magnetometer in combination with separate types of flux-gate sensors has high reliability, resistance to interferences, insignificant power consumption, relatively small weight and dimensions. The use of such an option of magnetometer as a precision null-indicator will allow us to measure accurately the geomagnetic field components, to carry out the works, connected with different geophysical investigations; with determination of the magnetic deviation, created by different movable objects. With its sufficient sensitivity and high precision of transformation, as well as a sharp directivity graph, the magnetometer option under consideration may be used also in the tracking systems, allowing orientation of different objects on the geomagnetic field.

Keywords: geomagnetic field, magnetometer, flux-gate sensor, measuring procedure, synchronous detector, in-phase and quadrature-phase components, electric signal, test algorithm

For citation:

Bryakin I. V. Magnetometer with a Test Algorithm of Functioning, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 49–56.

DOI: 10.17587/mau.18.49-56

References

1. **Logachev A. A., Zaharov V. P.** *Magnitorazvedka* (Geomagnetics), Leningrad, Nedra, 1979, 351 p. (in Russian).
2. **Gordin V. M.** *Ocherki po istorii geomagnitnyh izmerenij* (Sketches on history of geomagnetic measurements), Moscow, IFZ RAN, 2004, 162 p. (in Russian).
3. **Ljahovickij F. M., Hmelevskoj V. K.** *Inzhenernaja geofizika* (The engineering geophysics), Moscow, Nedra, 1989, 252 p. (in Russian).
4. **Lanza R., Meloni A.** *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists*, Berlin, Springer, 2006, 280 p.
5. **Zvezhinskij S. S.** *Magnitometricheskie ferrozondovye gradiometry dlja poiska vzryvoopasnyh predmetov* (Magnitometrichesky of flux-gate the gradiometers for search of explosive subjects), *Spektelnika i Svjaz'*, 2009, no. 1, pp. 16–29 (in Russian).
6. **Bugaj A. I., Linko Ju. R., Soborov A. N. i dr.** *Ferrozondovyy magnitometr* (The flux-gate magnetometer), A. S., no. 930176 (SSSR), 1982, Bjul. no. 19 (in Russian).
7. **Bratland T., Caruso M. J., Schneider R. A., Smith C. H.** New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensors*, 1998, vol. 5, no. 12, pp. 4–46.
8. **Ripka P.** *Magnetic Sensors and Magnetometers*, Norwood, United States, Artech House, 2001, 516 p.
9. **Bryakin I. V.** *Jelektromoduljacionnyj ferrozondovyy magnitometr* (electromodulation of flux-gate the magnetometer), *Trudy tre'ej Rossijskoj Konferencii s Mezhdunarodnym Uchastiem "Tehnicheskie i Programnyye Sredstva Sistem Upravlenija, Kontrolja i Izmerenija" (UKI-12)*, Moscow, IPU RAN, 2012, pp. 610–618.
10. **Bryakin I. V.** *Magnitometr dlja sistem orientacii ob'ektov po magnitnomu polju* (The Magnitometer for systems of orientation of the objects on a magnetic field), *Trudy "Chetvertoj Mezhdunarodnoj Konferencii po Problemam Upravlenija" (MKPU-IV)*, Moscow, IPU RAN, 2009, pp. 1944–1953.
11. **Muhametshin A. M.** *Podzemnaja vektornaja magnitometrija v rudnichnoj geologii* (A underground vector magnetometry in miner geology), Ekaterinburg, IGD UrO AN SSSR, 1997, 214 p.

УДК 681.516.3

DOI:10.17587/mau.18.56-63

С. Г. Герман-Галкин, д-р техн. наук, проф., ggsg@yandex.ru,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики "ИТМО", Морская академия, г. Щецин,

Р. С. Гаврилов, канд. техн. наук, доц., roman_gavrilov85@mail.ru,

Ю. Н. Мустафаев, доц., mustafaev-spb@mail.ru,

Санкт-Петербургский Балтийский государственный технический университет им. Д. Ф. Устинова "Военмех"

Структурные и имитационные модели в модельно-ориентированном проектировании вентильного электропривода для опорно-поворотного устройства

Представлены результаты модельных исследований структурных и имитационных моделей вентильного электропривода опорно-поворотного устройства. Выделены этапы модельно-ориентированного проектирования (Model-Based Design, MBD) мехатронных систем в пакете MATLAB-Simulink. Рассмотрены алгоритмы генерации исполняемого кода для микроконтроллеров встраиваемых систем с помощью пакета MATLAB-Simulink.

Ключевые слова: структурная модель, имитационная модель, MATLAB-Simulink, электропривод, модельно-ориентированное проектирование, генерация кода

Введение

Проблемы разработки современных систем управления приборным электроприводом непосредственно связаны с задачами моделирования реальных физических объектов, с проектированием систем

управления, с тестированием и созданием рабочих прототипов. Надежность функционирования таких систем тесно связана с их телеметрией, которая также требует решения целого ряда сложных задач — от разработки алгоритмов кодирования, модуляции и фильтрации до оптимизации каналов связи,

протоколов передачи данных и их программной реализации.

Все более жесткие требования к срокам проектирования, возрастающая сложность проектов и необходимость совместной работы различных групп проектировщиков и инженеров, письменная документация, связь между главным исполнителем и подрядчиками, сложная цепочка поставок и растущая разнообразность аппаратных и программных средств заставляют проектировщиков искать новые решения.

Наиболее эффективным из новых методов решения этих задач является модельно-ориентированное проектирование (Model-Based Design, MBD). Этот метод объединяет в единый рабочий процесс разные этапы разработки системы, такие как формирование технических требований, моделирование, разработка системы, отладка и тестирование. Модельно-ориентированное проектирование помогает координировать работу различных групп разработчиков и позволяет выявлять ошибки на ранних стадиях, значительно сокращая время разработки и повышая эффективность проектирования.

При таком подходе к разработке новых изделий вместо физических прототипов и текстовых спецификаций применяется исполняемая модель. Эта модель используется на всех этапах разработки системы или объекта, по ней разработчик проводит имитационное моделирование как всей системы целиком, так и ее отдельных компонентов. Конечным результатом MBD является автоматическая генерация исполняемого кода для управляющего контроллера.

Наиболее удобным инструментом для реализации модельно-ориентированного проектирования систем управления является среда MATLAB-Simulink. Имеющиеся в ее составе приложения и библиотеки, как встроенные, так и подключаемые, дают разработчикам уникальные возможности по исследованию, проектированию и отладке систем управления в режиме реального времени.

Основные этапы MBD систем приборного электропривода в среде MATLAB-Simulink включают:

- математическое описание, синтез и моделирование динамических систем с компонентами различной физической природы;
- автоматическое генерирование кода;
- непрерывное тестирование и верификацию;
- разработку спецификаций проектируемой системы.

В статье рассматривается решение *первых двух этапов* MBD применительно к разработке вентильного электропривода опорно-поворотного устройства (ВЭП ОПУ) для оптических комплексов специального назначения.

При разработке модели такой системы приходится разрешать противоречия между точностью модели и ее простотой. При этом необходимо выполнить требование адекватности, т.е. соответ-

ствия модели реальному объекту относительно выбранных для исследования системы свойств.

Стремление сделать модель максимально приближенной к реальному объекту повышает ее сложность и, как следствие, затраты на разработку и программную реализацию. В некоторых случаях модель может стать настолько сложной, что отладка ее будет просто невозможна. Таким образом, модель должна быть достаточно простой (без потери адекватности!). Собственно, искусство моделирования и состоит в том, чтобы построить модель, которая наиболее адекватна из всех простых и наиболее проста из всех адекватных. В связи со сказанным само построение модели становится задачей творческой, требующей от исследователя значительных знаний, опыта, а порой и интуиции. В основе построения модели системы лежит математическое описание ее отдельных блоков различной физической природы и их связей. Поэтому математика, отражающая физику процессов в системе, должна присутствовать, а представлением этой математики являются компьютерные модели в среде MATLAB-Simulink.

При этом сами компьютерные модели в зависимости от решаемой задачи разделяются на два уровня:

1. Структурный уровень, базирующийся на математическом описании и использующий структурные блоки пакета Simulink и его расширений (Blocksets);
2. Имитационный уровень, использующий масштабированные блоки пакета Sim Power System.

Свойства структурных и имитационных моделей для рассматриваемых систем:

- структурная модель — это компьютерная реализация математического описания системы электропривода. Это математическое описание в структурной модели может быть осуществлено с использованием метода А. А. Булгакова (метод "гладкой составляющей") [1];
- структурная модель не требует значительных вычислительных ресурсов;
- структурная модель, основанная на математическом описании, дает возможность оценить взаимосвязь переменных состояния в описываемой системе, оценить влияние параметров системы на ее динамику, использовать современные методы синтеза адаптивных и робастных регуляторов для придания системе заданных качеств;
- результаты моделирования, полученные на структурной модели, могут рассматриваться как некоторые эталонные для сравнения с результатами, которые впоследствии должны быть получены на имитационных моделях с различной степенью детализации и, тем самым, выбрать адекватную модель для последующего проектирования;
- электромагнитные и электромеханические процессы в структурной модели, учитывающие только "гладкие составляющие", не учитывают

пульсации токов и напряжений как в машине, так и в силовом преобразователе, а следовательно, не позволяют рассчитать динамические потери в элементах, дополнительные потери в машине и не позволяют исследовать вопросы совместимости машины и преобразователя, преобразователя с сетью;

- в структурной модели отсутствуют блоки, отвечающие за преобразование и ориентацию системы координат. Эти преобразования "спрятаны" в математическом описании;
- имитационные модели — это маскированные блоки устройств силовой электроники и электромеханики, помещенные в библиотеки пакета расширения Sim Power System.
- имитационная модель требует значительных вычислительных ресурсов, зависящих от степени детализации параметров моделей полупроводниковых элементов;
- имитационная модель позволяет учесть пульсации токов и напряжений как в машине, так и в силовом преобразователе, а следовательно, позволяет рассчитать динамические потери в элементах преобразователя, дополнительные потери в машине, исследовать вопросы совместимости машины и преобразователя, преобразователя с сетью;
- имитационная модель может служить основой для быстрого прототипирования всей системы;
- аналогичность результатов структурной и имитационной модели служит подтверждением адекватности разработанных моделей.

1. Функциональная схема ВЭП ОПУ

Функциональная схема рассматриваемого ВЭП ОПУ приведена на рис. 1.

Она включает три подсистемы: информационную, энергоэлектронную и электромеханическую. Электромеханическая подсистема содержит объект управления (ОУ) и электромеханический преобразователь (ЭМП) — электрическую машину. Энергоэлектронная подсистема включает силовой полупроводниковый преобразователь (СПП) и вторичный источник питания (ВИП). Информационная

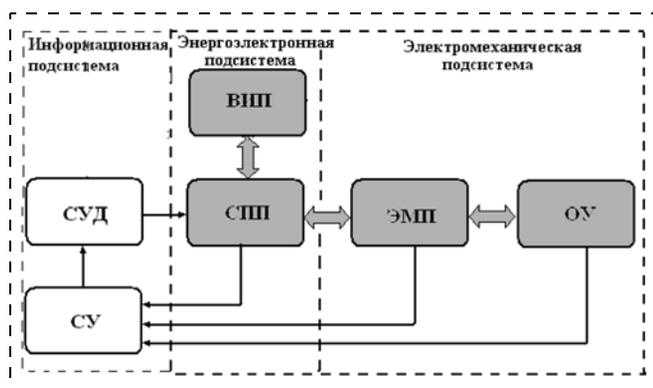


Рис. 1. Функциональная схема системы

подсистема содержит систему управления и диагностики (СУД) и блок сенсорных устройств (СУ).

Рассматриваемая система является нелинейной, импульсной с дискретно изменяющимися параметрами. При ее проектировании необходимо исследовать динамические, статические, энергетические, спектральные и ряд других характеристик. Поэтому ее анализ, а также синтез законов управления требует построения как структурных, так и имитационных моделей в среде MATLAB-Simulink.

2. Математическое описание электропривода для ОПУ, сравнение, выбор

Аналитическое исследование ВЭП ОПУ было осуществлено в работе [2], где рассчитаны электромагнитные и энергетические характеристики и даны рекомендации по синтезу структуры электропривода при его работе.

Рассматриваемые структуры электропривода показаны на рис. 2, они включают следующие блоки:

- синхронную магнитоэлектрическую машину (СМ);
- датчик положения ротора (ДПР);
- преобразователь координат (ПК);
- силовой полупроводниковый преобразователь (СПП);

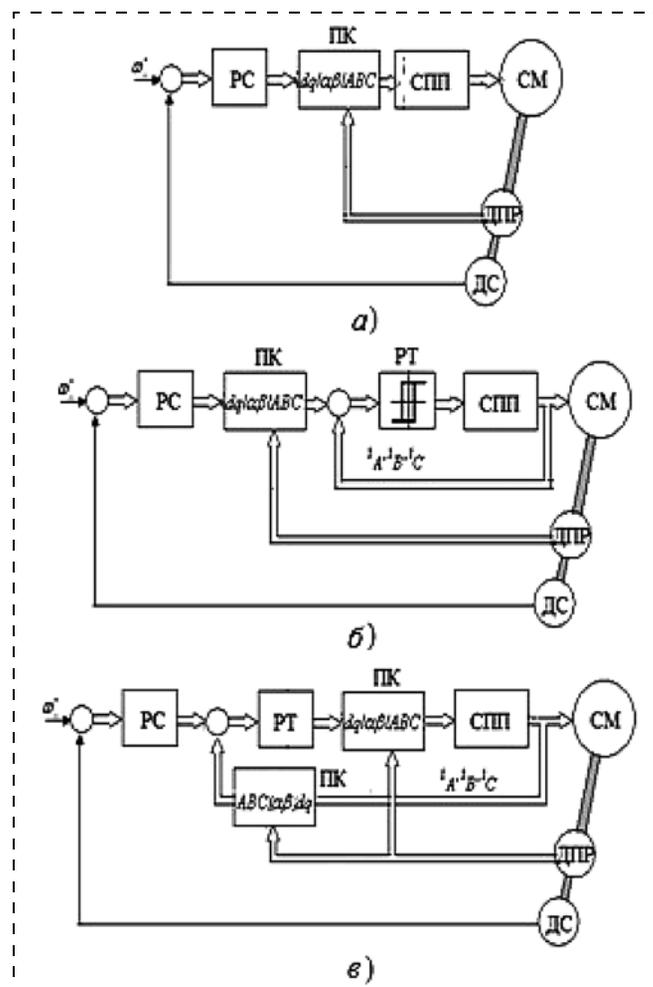


Рис. 2. Структурные схемы ВЭП

- датчик скорости (ДС);
- регулятор скорости (РС);
- регулятор тока (РТ, рис. 2, б, в).

В рассматриваемых системах широтно-импульсная модуляция реализуется в ПК и СПП, при этом амплитуда модулирующего сигнала определяется сигналом на входе ПК, а мгновенная фаза — углом поворота ротора (сигналом с ДПР). Таким образом, регулирование скорости осуществляется за счет изменения входного сигнала.

В качестве исполнительного двигателя в данной системе электропривода использован моментный двигатель RUSHServomotor RSM-P-36-550*50 ВТ. Параметры двигателя приведены ниже:

Номинальный момент, Н·м	670
Момент инерции ротора, кг·м ²	0,92
Число пар полюсов	48
Сопrotивление обмотки якоря при температуре 20 °С, Ом	3,66
Индуктивность обмотки якорной цепи, Гн	0,0396
Постоянная по моменту, C _M , Н·м/А	61,15
Постоянная по ЭДС, C _E , В·с/рад.	43,73
Напряжение питания, В	600

В структуре, показанной на рис. 2, а, главному (скоростному) контуру с регулятором скорости (РС) подчинен обязательный для всех приводов с СМ контур синхронизации управления силовым полупроводниковым преобразователем (КСУСПП), содержащий датчик положения ротора (ДПР), преобразователь координат (ПК), силовой полупроводниковый преобразователь (СПП) и исполнительный синхронный двигатель (СМ).

В этой структуре КСУСПП описывается следующей системой уравнений [2]:

$$\begin{aligned}
 0 &= L_d \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega L_q i_q; \\
 u_q &= L_d \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega L_d i_d + C_E \omega; \\
 M_e &= p \frac{m}{2} (C_M i_q + (L_d - L_q) i_d i_q); \\
 \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J} (M_e - M_H); \\
 \frac{d\theta_m}{dt} &= \omega_m, \quad \omega = p\omega_m,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где u_d, u_q, i_d, i_q — проекции напряжений и токов статора на оси d и q ; L_d, L_q — индуктивность обмотки статора по осям d и q ; R — сопротивления статорной обмотки; $\omega, \omega_m, M_e, M_H, \Theta_m$ — электрическая и механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала; C_M, C_E — конструктивные постоянные двигателя по моменту и противоЭДС; J — момент инерции ротора вместе с приведенным моментом инерции рабочего механизма; p — число пар полюсов; m — число фаз обмотки статора.

В структурах, показанных на рис. 2, б, в, добавляется контур тока с регулятором тока (РТ).

В структуре на рис. 2, б контур тока является внутренним по отношению к КСУСПП. В этом случае обратная связь по току реализуется в неподвижной системе координат и регулятор тока (РТ) выполняется релейным, обеспечивающим скользящее управление током на выходе СПП.

В структуре на рис. 2, в контур тока является внешним по отношению к КСУСПП. В этом случае управление током осуществляется во вращающейся системе координат, и регулятор тока синтезируется в соответствии с классической теорией синтеза линейных регуляторов. Реализация структур, представленной на рис. 2, в, предъявляет повышенные требования к программно-аппаратному обеспечению разработки. В связи с этим на первоначальном этапе исследовалась структура, показанная на рис. 2, б, так как в этой структуре контур тока реализуется как аналоговый.

В этой структуре КСУСПП описывается системой уравнений [2]

$$\begin{aligned}
 M_e &= p \frac{m}{2} C_M i_q; \\
 \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J} (M_e - M_H); \\
 \frac{d\theta_m}{dt} &= \omega_m, \quad \omega = p\omega_m.
 \end{aligned} \tag{2}$$

3. Структурная модель механической части ОПУ

Металлоконструкция опорно-поворотного устройства (ОПУ) вместе с электроприводом представляют собой единую замкнутую динамическую систему. Элементы металлоконструкций ОПУ обладают значительной податливостью, движущиеся части — большими моментами инерции, при этом вся механическая система находится под воздействием внешних возмущений.

Таким образом, объект управления представляет собой сложную пространственную механическую систему с большим числом элементов и значительными моментами инерции по исполнительным осям (см. таблицу), общий вид которой представлен на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Наименование параметра	Значение параметра	
	Привод азимута	Привод угла места
Статический момент трения, Н·м, не более	30	30
Момент инерции объекта $J_{об}$, кг·м ²	3250	1600
Крутильная жесткость частей ОПУ С, Н·м/рад	18 000 000	34 000 000
Коэффициент демпфирования ОПУ μ , кг·м ² ·Гц ²	19 112	87 224

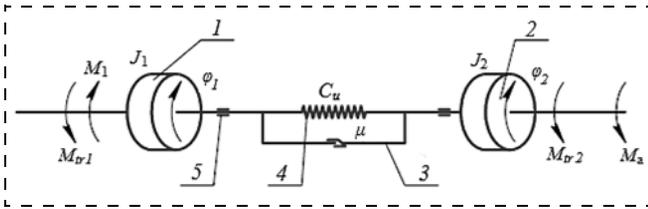


Рис. 4. Модель механической части привода наведения

Построение пространственной модели механической части ОПУ осуществляли в среде твердотельного моделирования, при этом полагали, что наиболее легкие элементы лишены массы и обладают только упругими свойствами, жесткие части конструкции считались абсолютно жесткими и наделенными только инерцией. С учетом этих допущений механические части приводов наведения исполнительных осей азимута (АЗ) и угла места (УМ) ОПУ были приведены к виду двухмассовой модели крутильных колебаний, представленной на рис. 4, где обозначено: 1 — ротор электродвигателя; 2 — исполнительный орган привода; 3 — демпфер с коэффициентом демпфирования μ ; 4 — пружина кручения с жесткостью C_u ; 5 — подшипник; J_1 — момент инерции ротора электродвигателя, включающий в себя часть момента инерции исполнительного органа привода наведения; J_2 — момент инерции исполнительного органа привода наведения за вычетом части, отнесенной к ротору электродвигателя; ϕ_1, ϕ_2 — углы поворота ротора электродвигателя и исполнительного органа; M_1 — электромагнитный момент двигателя; M_{tr1}, M_{tr2} — моменты сухого трения, приложенные соответственно к ротору электродвигателя и исполнительному органу привода наведения; M_a — момент внешнего возмущения.

Моменты сухого трения с учетом направлений, показанных на рис. 4, определяли по уравнениям:

$$\begin{aligned} M_{tr1} &= M_{tr1m} \text{sign} \dot{\phi}_1, \\ M_{tr2} &= M_{tr2m} \text{sign} \dot{\phi}_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где M_{tr1m} и M_{tr2m} — моменты сопротивления вращению, включающие в себя моменты трения и моменты сопротивления вращению гидро- и кабелепереходов.

Математическое описание электропривода ОПУ осуществляется во вращающейся со скоростью ω системе координат, продольная ось d которой совмещается с потокоцеплением возбуждения. Для привода осимутальной оси, собранного по структуре рис. 2, б, это описание может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} M_e &= p \frac{m}{2} C_M i_q; \\ \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J_{дв} + J_{об}} (M_e - M_H); \\ M_e &= (J_{дв} - J_{об}) \frac{d\omega_m}{dt} + \mu(\omega_m - \omega_{ОПУ}) + c(\Theta_m - \Theta_{ОПУ}); \\ \frac{d\Theta_m}{dt} &= \omega_m, \quad \omega = p\omega_m, \end{aligned} \quad (4)$$

где C_M — постоянная по моменту двигателя; μ — коэффициент демпфирования металлоконструкции ОПУ; c — крутильная жесткость; $J_{дв} + J_{об}$ — суммарный момент инерции ротора двигателя и объекта управления; $\omega_{ОПУ}, \Theta_{ОПУ}$ — механическая угловая скорость и угловое перемещение оси ОПУ.

Датчик положения в электроприводе устанавливается так, чтобы ток якоря двигателя был сдвинут на 90° эл. по отношению к потокоцеплению возбуждения, т.е. $i_q = I_q^*, i_d = 0$. Структурная модель электропривода и металлоконструкции азимутальной оси ОПУ, составленная по уравнениям (4), представлена на рис. 5. Модель позволяет исследовать переходные режимы работы и определять динамические характеристики системы.

В модели выделены три блока: ПИ регулятор скорости, блок, в котором осуществляется преобразование системы координат и их ориентация (уравнения (2)), а также блок металлоконструкции ОПУ (уравнения (4)), в котором подсистема *Friction*, реализующая кусочно-линейный закон сил трения (уравнения (3)), имеет вид, представленный на рис. 6.

Графики переходных процессов в контуре скорости представлены на рис. 7.

Ввиду отсутствия ограничения на скорость нарастания тока (момента) двигателя можно наблюдать существенную разницу скоростей ротора двигателя и исполнительного органа в начальный момент подачи управляющего сигнала.

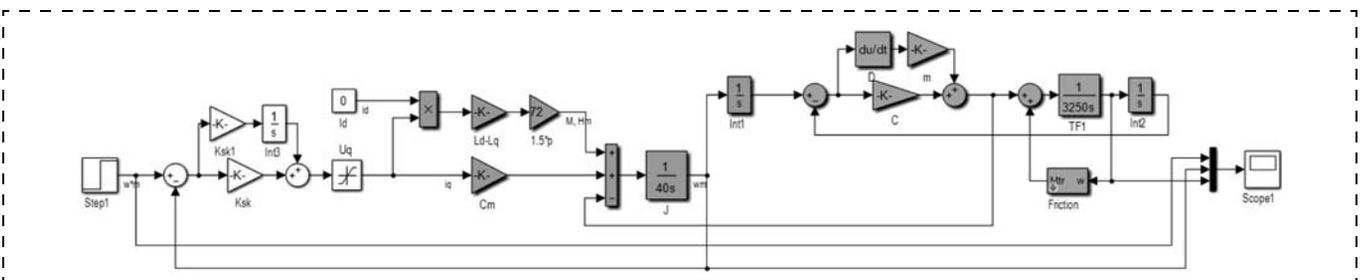


Рис. 5. Структурная модель вентильного электропривода и металлоконструкции азимутальной оси ОПУ

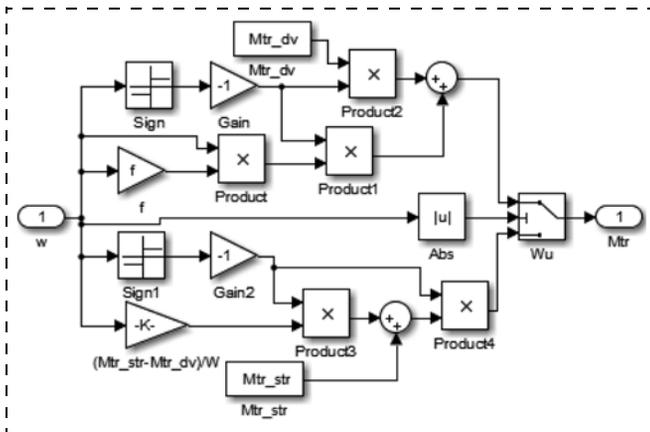


Рис. 6. Модель, реализующая кусочно-линейный закон сил трения в ОПУ

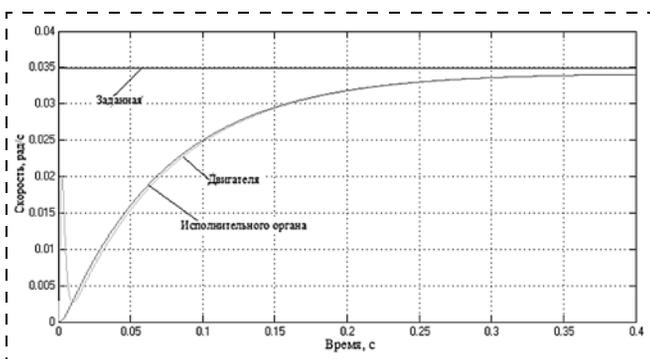


Рис. 7. Переходный процесс в контуре скорости (ступенчатое воздействие)

В структурной модели электропривода отдельно реализован только регулятор скорости. Преобразование системы координат и ее соответствующая ориентация "спрятаны" в самой модели.

Для того чтобы выделить блоки, отвечающие за вращение и ориентацию системы координат, и обеспечить в дальнейшем их программную реализацию в микропроцессоре, необходимо разработать имитационную модель.

4. Имитационная модель ВЭП ОПУ

Имитационная модель вентильного электропривода и металлоконструкции азимутальной оси ОПУ представлена на рис. 8. Основное отличие этой модели от структурной состоит в том, что в ней основные элементы системы управления (ДПР, СМ, ПК, РС, РТ, СПП, ВИП, см. рис. 2, б) представляют собой отдельные блоки. Эти блоки позволяют обеспечить их программную реализацию в микропроцессоре при модельно-ориентированном проектировании. Кроме того, имитационная модель учитывает электромагнитные процессы, протекающие в источнике питания, силовом инверторе и двигателе, при ШИМ управлении по-

следним. Это дает возможность инженеру провести исследование электромагнитных, энергетических характеристик привода, проанализировать спектральный состав токов и напряжений в каждом элементе электрической цепи и правильно подобрать необходимую элементную базу.

В подсистеме *Current Regulator* реализован релейный регулятор в контуре тока. В подсистеме *Coordinate Transformation* реализовано преобразование координат, в подсистеме *Speed Controller* реализован пропорционально-интегральный регулятор контура скорости.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что:

- при одинаковой настройке контура скорости характер переходного процесса в скоростной системе в структурной и имитационной модели совпадают. Следовательно, динамические характеристики привода можно определить по любой из представленных моделей;
- структурная модель работает значительно быстрее виртуальной, однако, учитывая производительность современных компьютеров, объем вычислений в процессе моделирования не является ограничением;
- поэтапное исследование системы, начинающееся с математического описания и заканчивающееся созданием имитационных моделей системы, является важной составляющей быстрого прототипирования систем управления.

Разработанная имитационная модель представляет собой стенд, на котором происходит отладка алгоритмов управления, исследование переходных и установившихся режимов работы, определение статических, динамических, энергетических и иных характеристик. Конечным результатом данного этапа является отработанный алгоритм управления.

Дальнейшим развитием метода быстрого прототипирования систем управления является генерация исполняемого кода для выбранного типа процесса (STMicroelectronics, Texas Instruments и др.). Предлагаемый разработчику набор программных средств дает возможность реализации алгоритма работы системы любой сложности, не требуя от

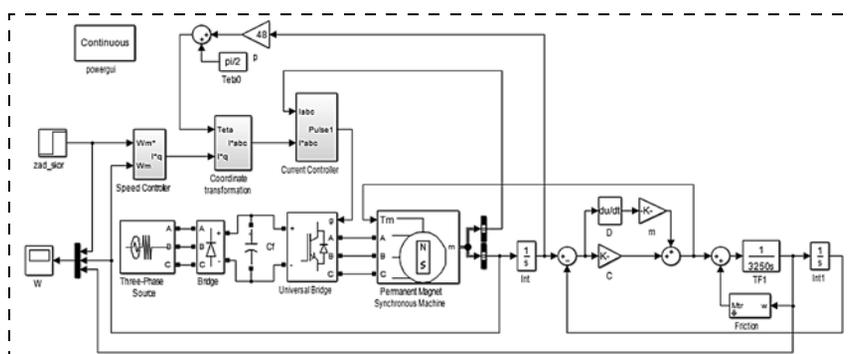


Рис. 8. Имитационная модель вентильного электропривода и металлоконструкции азимутальной оси ОПУ

инженера глубоких знаний в области программирования.

Средствами MATLAB-Simulink (Embedded Coder, Simulink Real-Time, Waijung и др.) генерируется и прошивается исполняемый код в управляющий

контроллер и проводится окончательная отладка программы управления. Преимуществом MATLAB является тот факт, что в него можно скачать и установить компиляторы для широкого спектра контроллеров. Следует учитывать тот факт, что просто генерация С кода из модели без привязки к контроллеру возможна только на 32-битной версии MATLAB, так как в 64-битной версии компилятор отсутствует.

На первом этапе MBD с помощью программы CubeMX создается образ контроллера, который используется в системе управления, проводится настройка всех используемых входов/выходов, АЦП, ЦАП, интерфейсов связи, таймеров, всего, что нужно в системе управления. На рис. 9 представлен образ контроллера STM32F103VGT6 для управления вентильным двигателем со встроенным энкодером.

В данном проекте для управления двигателем используются три АЦП для оцифровки сигналов с датчиков тока, два таймера: первый таймер используется для генерации шести ШИМ импульсов управления силовыми ключами преобразователей, второй таймер используется для обработки сигналов, поступающих от энкодера и USART2 для приема заданной скорости.

Во вкладке меню Project/Settings выбирается среда, для которой будет генерироваться проект, а также прописываются все пути к папке проекта (рис. 10).

На втором этапе модельно-ориентированного проектирования перестраивается модель системы управления (см. рис. 8) с помощью элементов библиотек *Simulink* и элементов Target Support Package — STM32 Adapter. Модель системы управления приводом представлена на рис. 11. На следующем этапе выполняется настройка компилятора (вкладка Code Generation окна Configuration Parameters).

Если в модели нет ошибок, то после успешной компиляции программа автоматически подключит все необходимые библиотеки и сгенерирует проект под выбранную среду разработки (в частности Keil).

При удачной компиляции программа сгенерирует исполняемый HEX файл, который можно загрузить в контроллер либо средствами Keil, либо

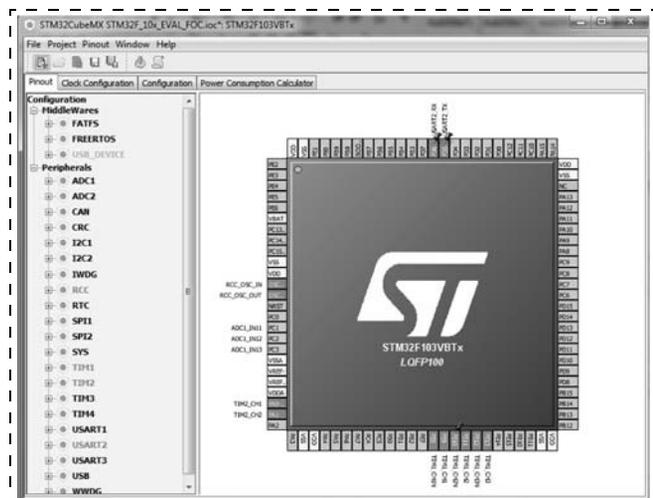


Рис. 9. Окно программы CubeMX с образом контроллера

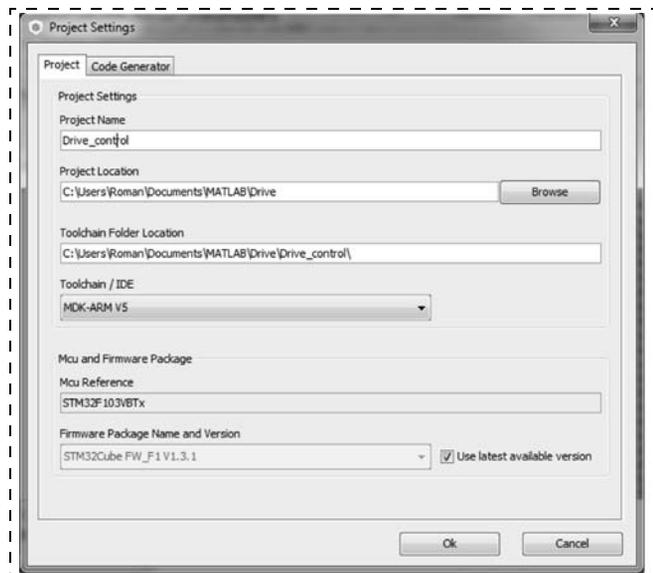


Рис. 10. Установка параметров проекта

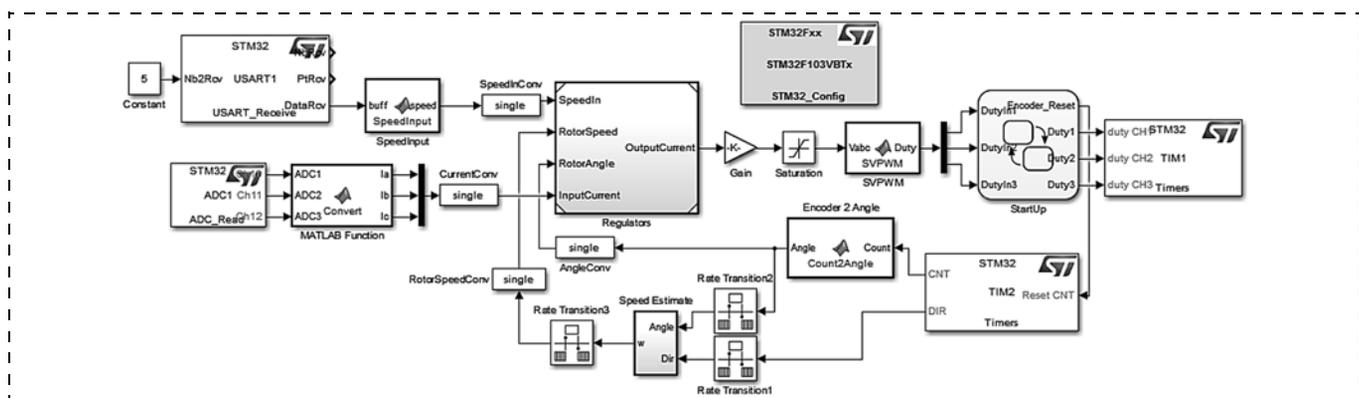


Рис. 11. Модель системы управления

с помощью программатора посредством утилиты STM32 ST-LINK. Таким образом, изложенный выше алгоритм коротко описывает процесс разработки системы управления с генерацией исполняемого кода для любого типа контроллера STM32.

Список литературы

1. Булгаков А. А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1970.
2. Герман-Галкин С. Г., Гаврилов Р. С. Энергетические свойства моментного электропривода пространственной стабилизации опорно-поворотного устройства // Матер. Междунар. конф. "Экстремальная мехатроника и робототехника". Дзубга, 2009.

3. Диллабер Э., Кендрик Л., Джин В. Практические стратегии для перехода на модельно-ориентированное проектирование встроенных приложений // Компоненты и технологии. 2011. № 10.

4. Ефремов А. А., Зенков С. М. Модельно-ориентированное проектирование для решения задач автоматизации // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. "Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях". Москва, 4–8 апреля 2011 г.

5. Бартев В., Бартев А. Модельно-ориентированное проектирование генератора случайных чисел // Современная электроника. 2014. № 2.

6. URL: <http://microtechnics.ru>

Structural and Simulation Models in the Model-oriented Designing of the Electric Valve Actuator for a Rotary Support Device

S. G. German-Galkin, gsg@yandex.ru, R. S. Gavrilov, roman_gavrilov85@mail.ru,
Yu. N. Mustafayev, mustafaev-spb@mail.ru

Corresponding author: German-Galkin Sergei G., D. Sc., Prof., National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO), 197101, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: gsg@yandex.ru

Received on May 05, 2016

Accepted on May 22, 2016

The article is devoted to the problems of development of the modern systems for control of the electric valve actuator of the rotary support device (RSD). It examines the tasks of modeling of real physical objects, including designing of the control systems, testing and development of the working prototypes. The most effective solution to the set tasks is the ModelBased Design — MBD. This method integrates into a single working process different stages of designing of the system, such as formulation of the technical requirements, modeling, development of the system, its debugging and testing. The most convenient instrument for realization of the model-oriented designing of the control system is MATLAB-Simulink environment. In this work on the example of two-coordinate RSD for the electric valve actuator of the azimuthal axis the first stages of MBD are considered in detail:

— Development of the structural models based on a mathematical description and using the structural blocks of Simulink package and its Blocksets;

— Development of the simulation models, using the masked blocks of SimScape package;

— Development of the executable code by means of MATLAB-Simulink for controllers of STM32F103 series.

Kits of program resources — MATLAB-Simulink, CubeMX, and Keil, the set of library modules — Target Support Package — STM32 Adapter, etc., offered to the developer, provide an opportunity for realization of the algorithm for operation of the systems of any complexity, which do not require engineers' deep knowledge in the area of programming. On the example of the developed system for control of the electric valve actuator of the azimuthal axis of RSD the algorithm for development of the executable code was presented, consisting of the following steps:

— Initialization of the controller (indication of the peripheral modules involved in the control system with their tuning) in CubeMX program;

— Programming of the algorithm for operation of the controller in MATLAB-Simulink environment with the use of different library modules, including the embedded and the pluggable ones;

— Generation of the executable code with its subsequent recording in the microcontroller.

Keywords: structural model, simulation model, MATLAB-Simulink, electric drive, model-oriented design, code generation

For citation:

German-Galkin S. G., Gavrilov R. S., Mustafayev Yu. N. Structural and Simulation Models in the Model-oriented Designing of the Electric Valve Actuator for a Rotary Support Device, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 56–63.

DOI: 10.17587/mau.18.56-63

References

1. Bulgakov A. A. *Novaya teoriya upravlyaemh vipryamiteley* (The New theory of the guided rectifiers), Moscow, Nauka, 1970 (in Russian).

2. German-Galkin S. G., Gavrilov R. S. *Energeticheskie svoystva momentnogo elektroprivoda prostranstvennoy stabilizatsii oporno-povrotnogo ustroystva* (Power properties of the torque electric drive of the spatial stabilizing of supporting turning device), *Materials of the International conference "Extreme mechatronics and robotics"*, Dzhubga, 2009, pp. 215–219 (in Russian).

3. Dillaber E., Kendrick L., Jean V. *Prakticheskie strategii dlya perehoda na model'no-orientirovannoe proektirovanie vstroennih prilozheniy* (Practical strategies for passing to the model-oriented planning of built-in applications), *Componenty i Tehnologii*, 2011, no. 10 (in Russian).

4. Efremov A. A., Zenkov S. M. *Model'no-orientirovannoe proektirovanie dlya resheniya zadach avtomatizatsii* (Model-Based Design for automation solutions) *Abstracts of the International scientific-practical conference "The advanced information technology, tools and automation systems and their implementation at Russian enterprises"*, Moscow, 2011, (in Russian).

5. Bartenev V., Bartenev A. *Model'no-orientirovannoe proektirovanie generatora sluchainykh chisel* (Model-Based Design of random number generator), *Sovremennaya Electronica*, 2014, no. 2 (in Russian).

6. Available at: <http://microtechnics.ru>

М. П. Романов, д-р техн. наук, директор Института кибернетики, m_romanov@mirea.ru,
А. М. Романов, канд. техн. наук, ассистент, romanov@mirea.ru,
Е. Н. Каширская, канд. техн. наук, доц., liza.kashirskaya@gmail.com,
В. А. Холопов, канд. техн. наук, доц., holopov@gmail.com, **А. И. Харченко**, аспирант,
 Московский технологический университет

Новая архитектура систем управления исполнительного уровня для дискретного машиностроительного производства¹

Предложена оригинальная архитектура системы управления исполнительного уровня для дискретного машиностроительного производства, которая сочетает в себе использование SCADA-системы и системы исполнения производственных заданий, основанной на применении виртуальных Forth-машин. Предлагаемая архитектура позволяет объединять в один производственный процесс операции, обладающие разной степенью автоматизации, и проводить замену ручных операций автоматизированными без изменения технологической документации.

Ключевые слова: ERP, MES, SCADA, Forth, мониторинг оборудования, производственное задание, дискретное машиностроительное производство

Введение

В основе развития современного промышленного производства лежит требование повышения его гибкости и эффективности за счет внедрения информационных технологий [1]. Важный шаг в этом направлении — появление систем управления производственными процессами (MES), которые осуществляют оперативное планирование и документальное сопровождение всех этапов производства — от поставки со склада исходных материалов до отгрузки готовой продукции [2]. В иерархии средств автоматизации производства MES-системы занимают промежуточное положение между системами ресурсного планирования ERP и системами исполнительного уровня, такими как системы диспетчеризации и сбора данных SCADA и системы распределенного числового управления DNC (рис. 1) [3].

Связь MES- и SCADA-систем в непрерывных производствах на сегодняшний день вполне отработана и широко применяется во всем мире. Для дискретных машиностроительных производств такая универсальная технология пока отсутствует. Это связано с широкой номенклатурой выпускаемой продукции, высокой вариативностью применяемых дополнительных приспособлений, оснастки и управляющих программ. При этом, в отличие от непрерывных производств, дискретные машиностроительные производства редко бывают полно-

стью автоматизированными, а степень автоматизации отдельных операций может существенно варьироваться даже в рамках производственного процесса обработки деталей одного типа.

Сложившаяся ситуация приводит к тому, что подавляющее большинство имеющихся MES-систем предполагает лишь частичную автоматизацию своего взаимодействия с технологическим оборудованием. Такая частичная автоматизация, как правило, ограничивается загрузкой управляющих программ в соответствующие системы ЧПУ по команде оператора станка. Такая ситуация тормозит как повышение эффективности существующих, так и создание новых предприятий, обладающих существенно более высоким уровнем автоматизации.



Рис. 1. Иерархия средств автоматизации производства

¹ Данная работа выполнена в рамках прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по заказу Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58016X0008).

Типы датчиков, используемых для мониторинга состояния оборудования на машиностроительном производстве, и их интерфейсы

Метод мониторинга	Требуемые датчики	Интерфейсы подключения датчиков
Контроль положения подвижных элементов высокотехнологического оборудования	Концевые датчики Датчики абсолютного положения Системы технического зрения Лазерные дальномеры	Дискретные входы 24В Цифровые интерфейсы SSI, BISS, EnDat Цифровой интерфейс Ethernet, полевые шины EtherCAT, Ethernet POWERLINK и др. Цифровые интерфейсы SSI, RS232, RS485. Аналоговый интерфейс 4...20 мА
Контроль скорости подвижных частей станков	Датчики скорости	Цифровой интерфейс EnDat, дискретные входы 24В, дифференциальные дискретные входы по стандарту RS422
Контроль усилий	Силовоймоментные датчики	Аналоговые интерфейсы 0...10В, 4...20 мА
Вибродиагностика	Акселерометры	Аналоговые интерфейсы 0...10В, 4...20 мА. Специальные модули обработки аналоговых сигналов, подключаемые к полевым шинам Modbus TCP, EtherCAT, Ethernet POWERLINK и др.
Контроль качества питающих напряжений	Реле контроля фаз Вольтметры Амперметры Комплексные модули контроля качества питающих напряжений	Дискретные входы 24В Аналоговые интерфейсы $\pm 10В$, 4...20 мА. Специальные модули, подключаемые к полевым шинам Modbus TCP, EtherCAT, Ethernet POWERLINK Аналоговые интерфейсы $\pm 10В$, 4...20 мА. Специальные модули, подключаемые к полевым шинам Modbus TCP, EtherCAT, Ethernet POWERLINK и др. Специальные модули, подключаемые к полевым шинам Modbus TCP, EtherCAT, Ethernet POWERLINK и др.
Контроль температуры	Датчики температуры Тепловизоры	Аналоговые интерфейсы $\pm 10В$, 4...20 мА, pt100, pt1000, входы термопар Аналоговый видеосигнал, цифровой интерфейс Ethernet
Контроль характеристик технических жидкостей и газов	Расходомеры Датчики давления Датчики уровня	Аналоговые интерфейсы $\pm 10В$, 4...20 мА, HART Аналоговые интерфейсы $\pm 10В$, 4...20 мА, HART Дискретные входы 24В Аналоговые интерфейсы $\pm 10В$, 4...20 мА
Контроль качества воздуха на рабочем месте	Датчики задымления Газоанализаторы Датчики влажности Датчики концентрации пыли	Дискретные входы 24В Аналоговые интерфейсы $\pm 10В$, 4...20 мА Аналоговые интерфейсы $\pm 10В$, 4...20 мА Цифровые интерфейсы USB, RS232, RS485, Ethernet. Аналоговый интерфейс 4...20 мА
Датчики контроля доступа персонала в опасную зону	Датчики открытия двери Световые барьеры Датчики присутствия/движения Лазерные сканеры (Лидары) Считыватели RFID-меток и магнитных карт	Дискретные входы 24В Дискретные входы 24В Дискретные входы 24В Цифровой интерфейс Ethernet, полевые шины Modbus TCP, EtherCAT и др. Цифровые интерфейсы Ethernet, RS232, RS485

Целью данного исследования является разработка универсальной архитектуры аппаратно-программных средств исполнительного уровня для систем управления дискретным машиностроительным производством. Такая архитектура позволила бы объединить на базе единой платформы все средства супервизорного мониторинга и управления станочным и робототехническим оборудованием, а также обеспечила бы единый интерфейс взаимодействия с MES-системой для рабочих мест, обладающих различной степенью автоматизации.

Архитектура аппаратного обеспечения

Главным требованием, предъявляемым к новой архитектуре, является требование использования единых аппаратно-программных средств для комплексного решения задач управления и мониторинга состояния оборудования на дискретном машиностроительном производстве.

Обеспечение качественного мониторинга состояния оборудования сопряжено с необходимостью

анализа показаний большого числа разнородных датчиков (табл. 1).

Выбор интерфейса для подключения датчиков и производственного оборудования

Поддержка столь широкой номенклатуры интерфейсов на базе одного устройства сбора данных является задачей крайне трудоемкой и экономически нецелесообразной. Наилучшим решением, хорошо зарекомендовавшим себя на практике, является использование распределенных модулей входов/выходов на базе полевых шин [4]. Таким образом, задача выбора полевой шины, которая ляжет в основу разрабатываемой универсальной архитектуры, является актуальной.

В качестве критериев для оценки пригодности полевой шины были выбраны распространенность на рынке среди производителей модулей промышленных входов-выходов, соответствие быстродействия классу решаемых задач, пропускная способность, возможность передачи данных по стандарт-

ным протоколам на базе TCP/IP, а также наличие открытого стандарта и готовых решений для реализации ведущих и ведомых устройств. Рассмотрим каждый из указанных выше критериев в отдельности.

◆ *Занимаемая доля рынка*

Доля рынка, занимаемая той или иной полевой шиной, определяет ее распространенность среди поставщиков и потребителей компонентов, а также косвенно говорит о широте номенклатуры различных типов входов-выходов, которые смогут быть в дальнейшем подключены с ее использованием к исполнительному уровню системы управления производством. В данной работе была использована информация о доле рынка, занимаемой каждой из рассматриваемых полевых шин, на основании исследований IMS Research по состоянию на 2013 г.

◆ *Быстродействие*

Быстродействие полевой шины, как правило, определяется минимальным временем цикла обмена данными и джиттером, возникающим при синхронизации подключенных к шине устройств. Чем меньше эти два параметра, тем с большей частотой и точностью система мониторинга сможет фиксировать работу оборудования. Это, в свою очередь, позволит учитывать при анализе возможных неисправностей и более динамичные процессы. В работе [5] дается оценка постоянных времени процессов, протекающих в системах управления, в зависимости от области автоматизации (табл. 2). Стоит отметить, что для корректности последующего анализа время цикла полевой шины должно быть, как минимум, в два раза меньше, чем постоянная времени наблюдаемого процесса, а джиттер должен быть, как минимум, в два раза меньше используемого времени цикла. Анализ табл. 2, в которой представлены характеристики датчиков для мониторинга, показывает, что постоянные времени в процессах, анализируемых системой мониторинга на дискретном машиностроительном производстве, лежат в диапазоне от 1 мс до 1 с.

Таблица 2

Типы датчиков, используемых для мониторинга состояния оборудования на машиностроительном производстве, и их интерфейсы

Область автоматизации	Минимальные значения постоянных времени процессов	Максимальные значения постоянных времени процессов
Системы хранения	30 мс	15 с
Конвейерные системы и другие простые системы управления. (большинство систем управления)	1 мс	1 с
Станки и робототехнические системы	50 мкс	50 мс
Системы электропривода	1 мкс	1 мс

В робототехнических системах могут протекать отдельные процессы, имеющие постоянные времени менее 1 мс, но их анализ, как правило, проводится в самой системе управления роботом с использованием аппаратно-программных средств, обладающих соответствующим быстродействием. Таким образом, можно сделать вывод, что для класса задач, решаемых системой мониторинга, необходимо, чтобы полевая шина обеспечивала цикл в диапазоне от 500 мкс до 500 мс с джиттером не хуже 250 мкс.

◆ *Пропускная способность и передача данных по протоколам на базе TCP/IP*

Для упрощения аппаратного обеспечения предлагаемой архитектуры и использования единых аппаратных средств как для мониторинга, так и для управления технологическим оборудованием предлагается использовать полевые шины не только для подключения датчиков, но и для передачи управляющих программ на роботы и станки с ЧПУ. Основными интерфейсами подключения для систем ЧПУ на сегодняшний день являются RS232, RS485 и Ethernet. Последний приобретает все большую популярность при взаимодействии между системами управления разных уровней. При этом Ethernet с использованием специальных интерфейсных модулей позволяет инкапсулировать в себя более медленные протоколы RS232 и RS485. По этой причине при выборе полевой шины рассматривались только шины с пропускной способностью не менее 100 Мбит/с, при этом особое внимание уделялось возможности прозрачной передачи через них трафика протоколов на базе TCP/IP. Такие шины в подавляющем большинстве случаев используются в станках с ЧПУ, подключаемых по интерфейсу Ethernet.

◆ *Наличие открытых решений*

Последним критерием при выборе шины явилось наличие открытого стандарта и готовых открытых реализаций для ведущего и ведомых устройств. Данный критерий косвенно показывает доступность полевой шины для сторонних разработчиков, а также относительные трудозатраты на реализацию на ее базе новых устройств.

◆ *Сравнение наиболее распространенных полевых шин на базе Ethernet*

Сравнение полевых шин по указанным выше критериям проводилось на основе материалов работ [5–7]. Результаты данного сравнения приведены в табл. 3.

Полностью соответствуют требованиям по быстродействию только две из рассмотренных шин: Ethernet POWERLINK и EtherCAT. По остальным критериям эти шины также сопоставимы. Выгодным отличием Ethernet POWERLINK от EtherCAT является ее распространение под лицензией BSD, которая не накладывает никаких существенных ограничений на разработчиков, и наличие готовых

Результаты сравнения полевых шин с точки зрения применения аппаратно-программных средств исполнительного уровня для систем управления дискретным машиностроительным производством

Критерий	PROFINET	EtherNet/IP	Modbus TCP	EtherCAT	Ethernet POWERLINK
Занимаемая доля рынка	30 %	30 %	17 %	7 %	9 %
Наличие открытого стандарта и лицензионные ограничения	Открытый стандарт, спецификация по платной подписке	Открытый стандарт, спецификация по платной подписке	Открытый стандарт с открытой спецификацией	Открытый стандарт, спецификация по платной подписке, наличие сборов за создание ведомых устройств	Открытый стандарт с открытой спецификацией
Наличие открытых бесплатных решений для реализации ведущего и ведомого устройств	Нет	Есть только для ведомого устройств	Есть	Есть для ведущего устройства, но без открытой лицензии	Есть
Возможность использования совместно с полевой шиной стандартных сетевых протоколов, основанных на стеке TCP/IP	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть, отдельно от данных, требующих реального времени
Соответствие цикла обмена сети классу задач, решаемых системой управления исполнительного уровня	Соответствует при управлении в системах с малой динамикой	Соответствует только с расширением CIPsync	Соответствует при управлении в системах с медленной динамикой	Соответствует	Соответствует

реализаций под различные платформы, начиная от встраиваемых компьютеров и заканчивая ПЛИС. Последнее существенно упрощает для разработчиков станков интеграцию встроенных систем мониторинга и контроля неисправностей с системами управления, построенными на предложенной в данной работе архитектуре. В связи с этим в качестве основного средства информационного обмена с датчиками, станками ЧПУ и робототехническими системами предлагается выбрать именно шину Ethernet POWERLINK.

Выбор аппаратных средств реализации исполнительного уровня системы управления

С точки зрения задач мониторинга оптимальной программной платформой, хорошо зарекомендовавшей себя на практике, является SCADA-система. Большинство из представленных SCADA-систем имеют трехуровневую архитектуру [8], показанную на рис. 2.

Нижний уровень составляют точки сбора данных и формирования управляющих воздействий.

В качестве среднего уровня выступает SCADA-сервер, который агрегирует данные со всех программируемых логических контроллеров (ПЛК), ведет журналы сигналов и аварийных ситуаций, анализирует возможные сбои и неисправности, а также осуществляет супервизорное управление отдельными ПЛК.

Верхний уровень составляют операторские станции и иные компьютерные системы, использующие результаты работы SCADA-системы и формирующие для нее задания, в том числе MES-систем.

В основном описанная архитектура применяется на непрерывных рецептурных производствах, однако с рядом уточнений она может быть применена и к дискретному машиностроительному производству.

Главным отличием дискретного машиностроительного производства от непрерывного рецептурного является высокая вариативность задач, выполняемых на одном и том же рабочем месте в течение одной смены. Рецепт, как правило, позволяет изменить отдельные параметры той или иной технологической операции, такие как температура или концентрация, в то время как на дискретном машиностроительном производстве меняется состав и порядок операций, выполняемых на автоматизированном рабочем месте. Это существенно усложняет централизованное управление всеми рабочими местами с помощью SCADA-сервера, и поэтому нами предлагается установка точек сбора данных и формирования управляющих воздействий на каждом автоматизированном рабочем месте, с последующим подключением к ним датчиков системы мониторинга станков с ЧПУ, а также робототехнических систем. Наиболее подходящая ре-

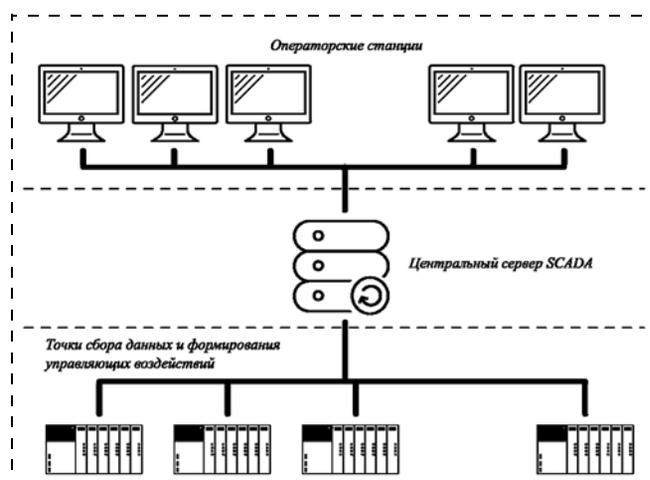


Рис. 2. Архитектура SCADA-систем

ализация точек сбора данных и формирования управляющих воздействий осуществляется на базе ПЛК или промышленных компьютеров, способных самостоятельно решать задачи управления оборудованием с ЧПУ и обеспечения правильного порядка действий при выполнении технологических операций. В последнем случае использование SCADA-сервера на среднем уровне оправдано только с точки зрения решения задач мониторинга, так как ПЛК исполнительного уровня могут взаимодействовать непосредственно с MES-системой, получая отсюда информацию о порядке действий и составе управляющих программ, которые необходимо выполнить в ходе той или иной производственной операции. Данный подход аналогичен по своей сути системам проектного менеджмента, применяемым для управления персоналом [9], с той лишь разницей, что здесь происходит взаимодействие не "человек—человек", а "машина—машина": MES ставит производственную задачу и устанавливает сроки ее выполнения, а промышленный контроллер подтверждает начало работы над задачей, контролирует заданный порядок действий и в конце сообщает об успешном выполнении задачи или о проблемах, приведших к невозможности ее завершения.

Связь между SCADA и ПЛК или промышленным компьютером наиболее целесообразно осуществлять по протоколу OPC UA [10], который на данный момент является основным стандартом для осуществления коммуникаций такого рода.

Вопрос выбора оптимального протокола связи между ПЛК и MES-системой требует дополнительных исследований. В данной работе для этих целей предлагается использовать HTTPS, так как он позволяет ПЛК взаимодействовать непосредственно с веб-интерфейсом пользователя MES-системы и

не требует для реализации этого взаимодействия внесения в MES-систему каких-либо изменений. Дополнительно к HTTPS предлагается использовать FTPS для передачи управляющих программ, так как этот файловый протокол реализован во многих современных ПЛК.

Таким образом, структурная схема аппаратных средств предлагаемой архитектуры исполнительного уровня системы управления дискретного машиностроительного производства будет иметь вид, представленный на рис. 3.

Архитектура программного обеспечения

Как отмечалось выше, для реализации функций мониторинга в рамках разработанной архитектуры предполагается использование SCADA-систем. Подробности применения этого подхода в данной работе рассматриваться не будут, так как он известен и широко освещен в литературе, например, в работах [8, 11].

Ключевой особенностью предлагаемой архитектуры с точки зрения программного обеспечения является прямое взаимодействие с MES-системой и использование специализированного языка программирования для описания технологических процессов, выполняемых на рабочем месте.

Выбор языка программирования для описания технологических процессов

Высокая вариативность технологических процессов на дискретном машиностроительном производстве не позволяет полностью автоматизировать весь технологический процесс [17]. На современных предприятиях, как правило, автоматизированы лишь основные технологические операции посредством систем ЧПУ, а вспомогательные технологические операции, связанные со сменой номенклатуры обрабатываемых деталей, автоматизируются крайне редко, что, в большинстве случаев, экономически не целесообразно. По этим причинам разработан язык описания основных и минимально необходимых вспомогательных операций, который реализуется в виде управляющих программ для систем ЧПУ, а для описания вспомогательных операций всего технологического процесса на сегодняшний день не разработано ни одного приемлемого языка. Применение для этих целей средств, предоставляемых SCADA-системами, представляется невозможным, так как они ориентированы на непрерывные рецептурные производства.

В качестве возможного решения в данной работе предлагается использование специального языка программирования, с помощью которого технолог сможет описать технологический процесс в целом, включая межоперационные вспомогательные операции, продиктованные необходимостью смены элемента номенклатуры выпускаемых изделий. Описание основных операций остается традици-

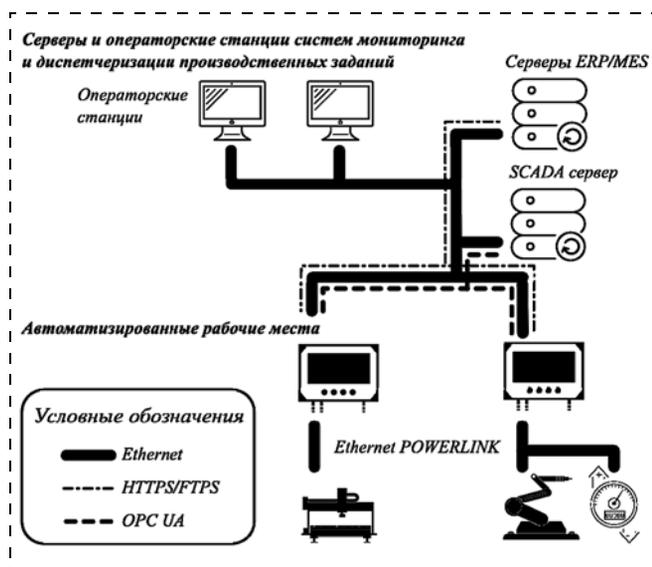


Рис. 3. Архитектура аппаратных средств исполнительного уровня системы управления дискретного машиностроительного производства

онным, и управляющие программы будут инкапсулированы как объекты в создаваемый язык программирования.

В процессе исполнения технологического процесса создаваемый язык программирования будет исполняться на ПЛК или на промышленном компьютере, установленном на автоматизированном рабочем месте. На этом языке будет определяться последовательность действий в ходе каждой производственной операции.

Чтобы обеспечить возможность применения данного подхода на частично автоматизированных рабочих местах, предлагается при необходимости выполнения той или иной ручной операции (например, замены приспособлений или установки заготовки) выводить оператору на экране соответствующую команду-запрос на выполнение нужной операции. Это позволит технологу использовать единые инструменты для описания всех производственных процессов вне зависимости от степени их автоматизации.

Чтобы выбрать язык программирования для описания технологических процессов, выполняемых на автоматизированных рабочих местах дискретного машиностроительного производства, сформулируем предъявляемые к языку требования.

◆ *Задачная ориентированность*

Поскольку целевой аудиторией выбираемого языка с точки зрения создания программ является не программист, а технолог, то сам язык должен быть максимально задачно-ориентированным, что позволит переходить от описания одного производственного процесса к описанию какого-либо иного производственного процесса с использованием минимального количества дополнительного кода. Данное требование осложняется тем, что различные машиностроительные производства имеют множество разных специализаций, поэтому подбор одного задачно-ориентированного языка для всех возможных типов дискретных машиностроительных производств является труднорешаемой проблемой.

◆ *Возможность абстрагирования от конкретных аппаратных средств*

Замена и модернизация оборудования на предприятии является естественным процессом, который в большинстве случаев не должен приводить к существенной переработке технологических программ. Таким образом, на уровне выбираемого технологического языка должна существовать возможность описания технологической операции, с абстрагированием от конкретных моделей оборудования, установленного на автоматизированном рабочем месте, и от степени его автоматизации.

◆ *Стойкость к кибератакам*

Современные принципы построения информационных систем предприятия [1] требуют учета возможности кибератак и, следовательно, должны

предусматривать действия для их предотвращения на архитектурном уровне.

С позиции кибербезопасности использование внутреннего технологического языка требует гарантий невозможности его использования для создания троянских программ. Достичь этого можно, например, ограничив доступ к аппаратным средствам и возможность подключения внешних библиотек, используя изолированные виртуальные машины и т.д.

◆ *Требования к аппаратному обеспечению*

Поскольку целевыми платформами для выполнения технологических программ являются ПЛК и промышленные компьютеры, нельзя не учитывать ограничения их аппаратного обеспечения, такие как малый объем оперативной памяти, использование низкопроизводительных процессоров с пассивным охлаждением, малый объем энергонезависимой памяти и т.д. Например, именно высокие требования к аппаратным ресурсам являются наиболее существенным препятствием к применению для решения рассматриваемой задачи такого широко распространенного языка, как Java.

◆ *Перспективы использования Forth*

Проведенный сравнительный анализ языков программирования показал, что наиболее пригодным для рассматриваемой в статье задачи является язык Forth [12]. Этот язык программирования стековых машин, предложенный Чарльзом Муром в 1971 г., не потерял своей актуальности до сих пор [13]. В основе Forth лежат понятия стека как основного средства обмена данными в программном обеспечении и слова, которое можно описать как совокупность других ранее объявленных слов. Основная идеология Forth [12] заключается в том, чтобы на основе базовых слов, реализованных в системе на этапе конфигурации, создать задачно-ориентированный язык программирования, оптимально подходящий для требуемой предметной области. В связи с этим Forth практически идеально удовлетворяет первому из описанных выше критериев, позволяя, с одной стороны, использовать унифицированные программные средства для выполнения технологических программ, а с другой — создавать язык, наилучшим образом соответствующий специализации конкретного производства. Помимо этого, Forth позволяет сделать код максимально похожим на естественный язык [12], применяемый в технологических картах, что будет способствовать сокращению времени на переучивание сотрудников предприятий.

Абстрагирование от конкретных аппаратных средств в языке Forth достигается использованием различных базовых словарей для разных исполнительных устройств. При этом технолог, создающий итоговую программу, может пользоваться для тестирования базовым словарем обобщенной модели оборудования каждого типа, а в процессе выпол-

нения ПЛК или промышленный компьютер, установленный на рабочем месте, будет использовать свой словарь, в котором учтены особенности реализации каждого из слов на основе учета возможностей конкретного аппаратного обеспечения.

Для выполнения кода Forth используются специальные стэковые виртуальные машины, исполнительный код которых, как правило, напрямую транслируется в базовые слова. Таким образом, варьируя набор базовых слов, можно гибко ограничивать возможности влияния программы, написанной на Forth, на другие компоненты системы, обеспечивая тем самым требуемый уровень кибербезопасности.

Как было отмечено выше, Forth тривиальным образом транслируется в машинный код, что обеспечивает его высокое быстродействие. А стэковые машины, используемые для его исполнения, имеют наиболее простую среди распространенных виртуальных машин архитектуру, что позволяет запускать программы на Forth не только на промышленных компьютерах и ПЛК, но даже на бюджетных микроконтроллерах [14] и ПЛИС [15].

Пример технологической программы на Forth представлен в листинге 1.

Листинг 1. Пример технологической программы на Forth для фрезеровки цилиндра, оформленный в виде нового слова "ОтфрезероватьЦилиндр"

```
ОтфрезероватьЦилиндр:
"Загрузить деталь в станок" ЗапросОператору
Станок ["cyl.cnc"] Запустить_CNC]
Станок ["G01 X = %Радиус, Y = %Высота" Вставить-
ПараметрыВСтроку КомандаCNC]
Робот ["get_result.cnc" КомандаCNC]
;
```

Как показывает листинг 1, Forth успешно позволяет совмещать в одном коде команды, выполняемые оператором, и управляющие программы, выполняемые на станке и погрузочном роботе.

Выбор программных средств реализации исполнительного уровня системы управления

Предлагаемая архитектура программного обеспечения исполнительного уровня системы управления дискретным машиностроительным производством представлена на рис. 4.

На верхнем уровне системы располагается серверное программное обеспечение (ПО) систем SCADA, MES и ERP. ПЛК или промышленный компьютер, установленный на каждом автоматизированном рабочем месте, получает из MES-системы по протоколу HTTPS данные о времени начала следующей операции и о ее параметрах. По протоколу FTP контроллер автоматизированного рабочего места загружает все необходимые для выполнения следующей операции управляющие программы для роботов и систем ЧПУ, а также технологическую программу операции на языке Forth. За обмен с MES и ERP отвечает блок обмена про-

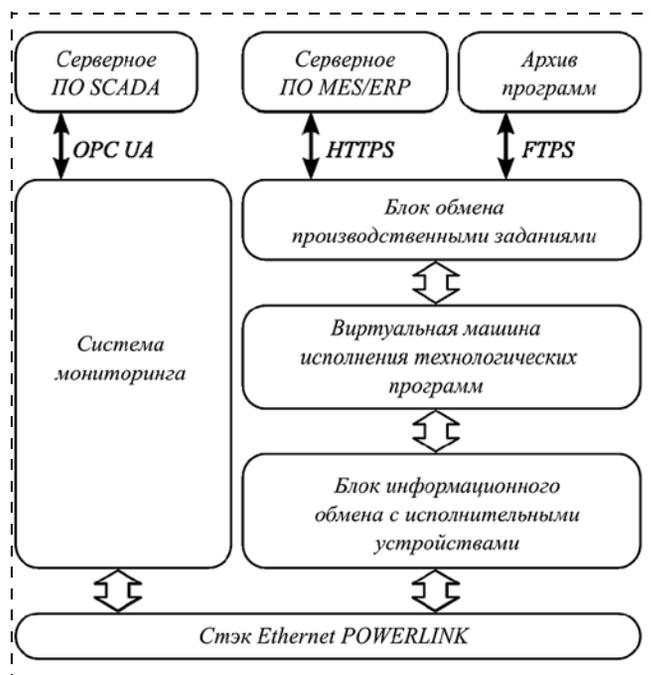


Рис. 4. Структурная схема программного обеспечения исполнительного уровня системы управления дискретным машиностроительным производством

изводственными заданиями. Как только наступает плановое время выполнения операции, технологическая программа поступает в виртуальную машину, которая ее исполняет, определяя последовательность действий в рамках одной операции и возможную вариативность исполнения операций.

К виртуальной машине подключен блок информационного обмена с исполнительными устройствами, который позволяет с помощью базовых слов Forth загружать управляющие программы в систему ЧПУ, управлять погрузочными или сборочными роботами, выдавать команды и запросы оператору через средства человеко-машинного интерфейса. По сути, блок информационного обмена с исполнительными устройствами реализует необходимый слой абстракции между технологическими программами и реальным оборудованием. По завершении технологической программы виртуальная машина делает отметку в MES-системе о завершении операции в блоке обмена производственными заданиями.

Параллельно и независимо от виртуальной машины исполнения технологических программ работает система мониторинга, которая собирает данные с датчиков, выставляет им метки времени и пересылает на сервер SCADA-системы по протоколу OPC UA.

Единственным элементом взаимодействия системы мониторинга с виртуальной машиной исполнения технологических операций является возможность последней сообщать об ошибках, возникающих при выполнении программ, в систему мониторинга для последующей фиксации этих данных в журнале аварийных сообщений.

Для проверки реализуемости предложенной архитектуры был поставлен эксперимент. На сервере с 64-битной архитектурой Intel в операционной системе Linux Ubuntu 14.04 LTS была развернута открытая система управления производством Odoo 9 Community, оснащенная возможностью выполнения отдельных функций MES-системы, таких как оперативное планирование и формирование производственных заданий.

В Odoo было создано производственное задание, включающее в себя три последовательные операции. В описании каждой операции была дана ссылка на производственную программу, расположенную на FTP-сервере.

На базе трех промышленных компьютеров В & R RP65 были реализованы точки сбора данных и формирования управляющих воздействий. Выбор контроллеров В & R был обоснован тем, что они оснащены встроенной системой ЧПУ, которая позволила провести эксперимент без использования дополнительного производственного оборудования. К системе ЧПУ были подключены по четыре исполнительных двигателя, с помощью которых обрабатывались управляющие программы. Тестирование программного кода промышленных компьютеров осуществлялось по методике, описанной в работе [16]. На рис. 5 представлено фото испытательного стенда.

В ходе эксперимента контроллеры поочередно выполнили производственные задачи, загрузив соответствующие управляющие программы в систему ЧПУ и сделав соответствующую отметку в системе Odoo после ее завершения.

Проведенный эксперимент показал реализуемость предложенного в данной работе подхода.

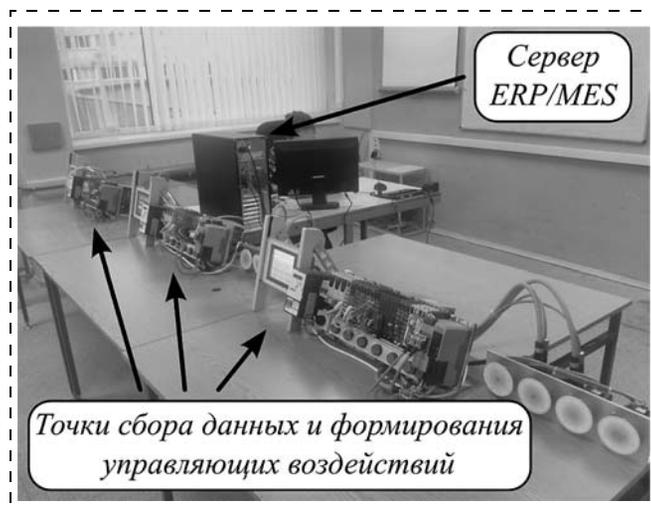


Рис. 5. Фото испытательного стенда

В данной работе предложена оригинальная архитектура реализации системы управления исполнительного уровня для дискретного машиностроительного производства. Она предполагает сочетание традиционного подхода, подразумевающего использование SCADA-системы для осуществления мониторинга состояния производственного оборудования, и системы исполнения производственных заданий, основанной на применении виртуальных Forth машин на каждом автоматизированном рабочем месте. Предлагаемая архитектура не только позволяет успешно объединять в единый производственный процесс операции, обладающие разной степенью автоматизации, но и обеспечивает возможность в ходе модернизации проводить замену ручных операций автоматизированными без изменения технологической документации. Проведенные экспериментальные исследования показывают реализуемость данного подхода и перспективность продолжения работ по данной тематике.

Список литературы

1. **Drath R., Horch A.** Industrie 4.0: Hit or hype? [industry forum] // IEEE industrial electronics magazine. 2014. Т. 8. № . 2. С. 56–58.
2. **McClellan M.** Applying manufacturing execution systems. CRC Press, 1997.
3. **Sauter T.** The continuing evolution of integration in manufacturing automation // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2007. Т. 1. № . 1. С. 10–19.
4. **Faldella E., Tucci P.** A model-driven approach to automated diagnosis of industrial distributed I/O systems based on fieldbus technologies Information // Communication and Automation Technologies: XXII International Symposium on, ICAT (2009). Bosnia, 2009. С. 1–7.
5. **Lachello L.** et al. System Comparison // The 5 Major Technologies Industrial Ethernet Facts. 2013. Iss. 2.
6. **Industrial Automation Open Networking Alliance and Luder A.** IAONA Handbook – Industrial Ethernet: (with a List of Producers) // IAONA, 2005.
7. **Денисенко В.** Протоколы и сети Modbus и Modbus TCP // СТА. 2000. № 4. С. 90–94.
8. **Stouffer K., Falco J., Scarfone K.** Guide to industrial control systems (ICS) security // NIST special publication. 2011. Т. 800. № 82. С. 16.
9. **Mishra A., Mishra D.** Software project management tools: a brief comparative view // ACM SIGSOFT Software Engineering Notes. 2013. Т. 38. № 3. С. 1–4.
10. **Hannelius T., Salmenpera M., Kuikka S.** Roadmap to adopting OPC UA // 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics. Daejeon, 2008. С. 756–761.
11. **Boyer S. A.** Scada: Supervisory Control and Data Acquisition // International Society of Automation. USA, 2009.
12. **Brodie L.** Thinking Forth. Punchy Pub, 2004.
13. **Riedel S., Bošnjak M., Rocktäschel T.** Programming with a Differentiable Forth Interpreter // arXiv preprint arXiv:1605.06640. 2016.
14. **De Ceballos F.** A Minimal Development Environment for the AVR Processor // 17th EuroForth Conference. Schloss Dagstuhl. 2001
15. **Bowman J., Garage W.** J1: a small Forth CPU Core for FPGAs / EuroForth 2010 Conference Proceedings. 2010. С. 43–46.
16. **Басок Б. М., Захаров В. Н., Френкель С. Л.** Об оценке чувствительности к сбоям тестов программ // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4, № 2 (11). С. 39–44
17. **Холопов В. А., Голубцов И. Н.** Классификация автоматизированных производств для определения уровня и метода их автоматизации // Ползуновский вестник. Электронная версия. 2012. Т. 1. С. 315–317.

A Novel Architecture for the Executive-Level Control Systems for a Discrete Machinery Production

M. P. Romanov, m_romanov@mirea.ru✉, **A. M. Romanov**, romanov@mirea.ru,
E. N. Kashirskaya, liza.kashirskaya@gmail.com, **V. A. Kholopov**, holopov@gmail.com, **A. I. Kharchenko**,
Moscow Technological University, Institute of Cybernetics, Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: **Romanov Mikhail P.**, D. Sc.,
Director of the Institute of Cybernetics, Moscow Technological University,
Institute of Cybernetics, Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: m_romanov@mirea.ru

Received on September 09, 2016

Accepted on September 16, 2016

This paper presents a novel architecture of the executive-level control system for management of the discrete machinery productions. It combines the use of a supervisory control and a data acquisition system, and the tasks of the execution system based on the use of virtual Forth-machine. The widely used solutions for modern manufacturing are based on interaction of the manufacturing execution system directly with the supervisory control and data acquisition system, but this is not suitable for a discrete machinery manufacture, because of complexity of its production process. In the proposed architecture the supervisory control and data acquisition system are used for the online state monitoring of the CNC-machines hardware, signal logging and fault prediction. The task execution system downloads the manufacturing task, designed as the Forth program, from the manufacturing execution system and uploads it into the virtual machine, which controls the sequence of operations during one manufacturing task. Besides, the task execution system includes information exchange module, which ensures a software abstraction layer between the virtual machine and the hardware. The proposed architecture allows us to combine in one manufacturing process operations with a different degree of automation, and ensures replacement of the manual processes with automated ones without changing the manufacturing tasks documentation. The experimental results show that the proposed architecture is implementable, which determines the relevance of the further development in this direction.

Keywords: ERP, MES, SCADA, Forth, hardware monitoring, manufacturing task, discrete machinery manufacturing

Acknowledgements: This work was done as a part of the applied research and experimental development commissioned by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (the unique identifier is RFMEFI58016X0008).

For citation:

Romanov M. P., Romanov A. M., Kashirskaya E. N., Kholopov V. A., Kharchenko A. I. A Novel Architecture for the Executive-Level Control Systems for a Discrete Machinery Production, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 64–72.

DOI: 10.17587/mau.18.64-72

References

1. **Drath R., Horch A.** Industrie 4.0: Hit or hype?, *IEEE industrial electronics magazine*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 56–58.
2. **McClellan M.** Applying manufacturing execution systems, CRC Press, 1997.
3. **Sauter T.** The continuing evolution of integration in manufacturing automation, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2007, vol. 1, no. 1, pp. 10–19.
4. **Faldella E., Tucci P.** A model-driven approach to automated diagnosis of industrial distributed I, O systems based on fieldbus technologies *Information, Communication and Automation Technologies: XXII International Symposium on*, Bosnia, 2009, ICAT (2009), pp. 1–7.
5. **Lachello L.** et al. System Comparison, *The 5 Major Technologies Industrial Ethernet Facts*, Iss. 2, Feb., 2013.
6. **Industrial Automation Open Networking Alliance and Luder A.** IAONA Handbook — Industrial Ethernet: (with a List of Producers), IAONA, 2005.
7. **Denisenko V.** Protocoli i seti Modbus i Modbus TCP (Protocols and networks Modbus and Modbus TCP), *STA*, 2000, no. 4, pp. 90–94.
8. **Stouffer K., Falco J., Scarfone K.** Guide to industrial control systems (ICS) security, *NIST Special Publication*, 2011, vol. 800, no. 82, pp. 16.
9. **Mishra A., Mishra D.** Software project management tools: a brief comparative view, *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 2013, vol. 38, no. 3, pp. 1–4.
10. **Hannelius T., Salmenpera M., Kuikka S.** Roadmap to adopting OPC UA, *6th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Daejeon, 2008, pp. 756–761.
11. **Boyer S. A.** Scada: Supervisory Control and Data Acquisition, *International Society of Automation*, USA, 2009.
12. **Brodie L.** Thinking Forth, PUNCHY Pub, 2004.
13. **Riedel S., Bošnjak M., Rocktäschel T.** Programming with a Differentiable Forth Interpreter, arXiv preprint arXiv:1605.06640, 2016.
14. **De Ceballos F.** A Minimal Development Environment for the AVR Processor, *17th EuroForth Conference.*, Schloss Dagstuhl, 2001.
15. **Bowman J., Garage W.** J1: a small Forth CPU Core for FP-GAs, *EuroForth 2010 Conference Proceedings*, 2010, pp. 43–46.
16. **Basok B. M., Zakharov V. N., Frenkel S. L.** About estimation of software tests sensitivity to transient faults, *Russian Technological Journal*, 2016, vol. 4, no. 2 (11), pp. 39–44.
17. **Kholopov V. A., Golubov I. N.** Klassifikacija avtomatizirovannyh proizvodstv dlja opredelenija urovnja i metoda ih avtomatizacii (Classification of automated production to determine the level and method of automation), *Polzunovskij Vestnik. Electronic Version*, 2012, vol. 1, pp. 315–317.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 01.11.2016. Подписано в печать 07.12.2016. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН117 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.

Рисунок к статье М. А. Аль Аккада, И. В. Абрамова, В. В. Хворенкова
«ОБРАТНАЯ КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
АМБИДЕКСТРАЛЬНЫМИ КОНЕЧНОСТЯМИ ЧЕЛОВЕКОПОДОБНОГО РОБОТА»

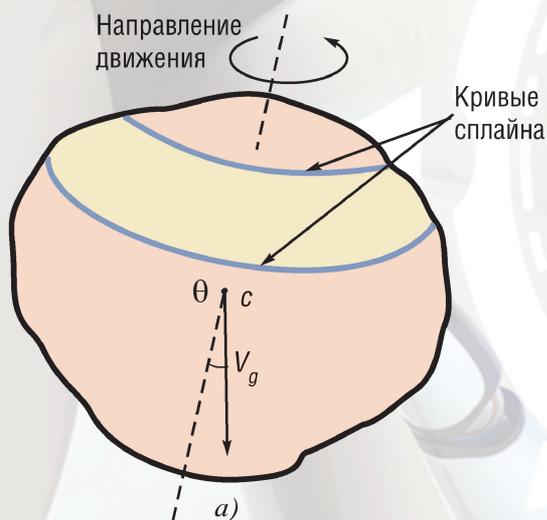


Рис. 3. Задача снятия кожуры с апельсина:

a – показаны c – центр тяжести объекта, V_g – вектор силы тяжести; b – показаны основные точки и кривая

Рисунок к статье С. Г. Германа-Галкина, Р. С. Гаврилова, Ю. Н. Мустафаева
«СТРУКТУРНЫЕ И ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ
В МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ОПУ»

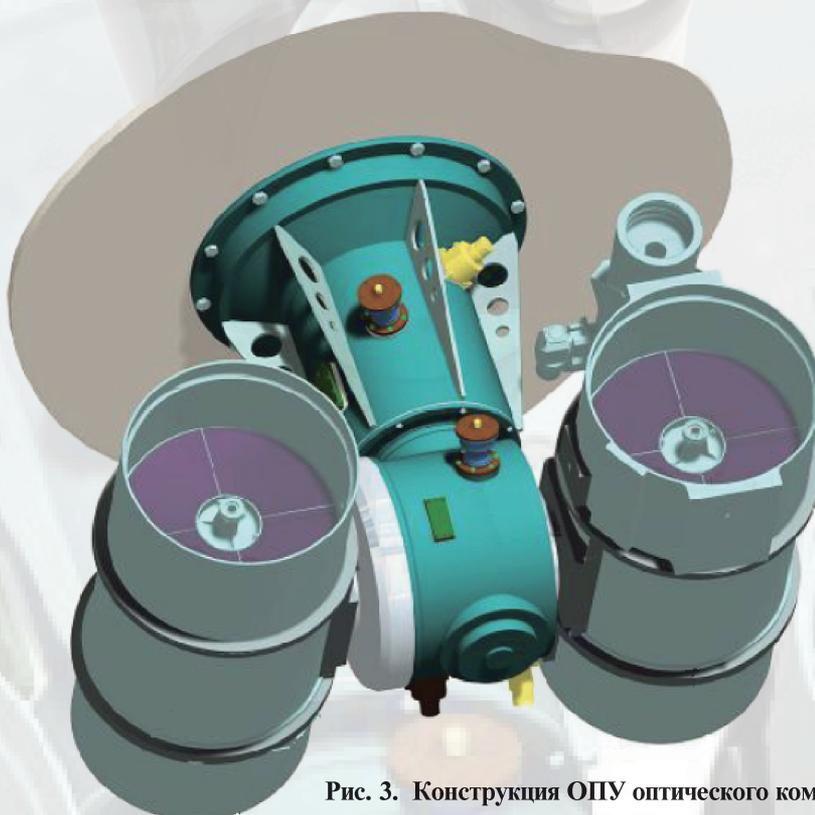
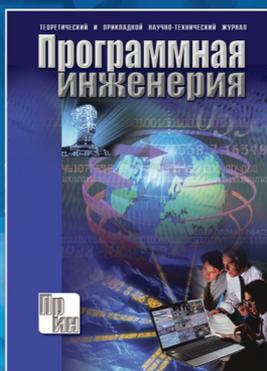


Рис. 3. Конструкция ОПУ оптического комплекса

Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ” выпускает научно-технические журналы



Теоретический и прикладной научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 22765; «Пресса России» – 39795

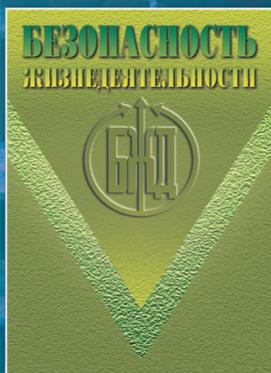


Ежемесячный теоретический и прикладной
научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 72656; «Пресса России» – 94033

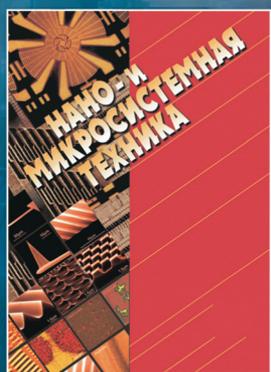


Научно-практический и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79963; «Пресса России» – 94032



Ежемесячный междисциплинарный

теоретический и прикладной научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79493; «Пресса России» – 27849

Все журналы
распространяются
только по подписке.

Оформить подписку можно
через подписные агентства
либо непосредственно
в редакции журналов.

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:
107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ”
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10.

E-mail: antonov@novtex.ru